



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**E AMBIENTAL**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E**  
**SANEAMENTO AMBIENTAL**

**SIMULAÇÕES DA IMPLANTAÇÃO DE AÇÕES DE**  
**GESTÃO NO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA E SEUS**  
**IMPACTOS NA CRISE HÍDRICA EM CAMPINA**  
**GRANDE-PB E REGIÃO**

**DÁTIA PAULA MARQUES MAIA LUCENA**

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2018

**Dátia Paula Marques Maia Lucena**

**SIMULAÇÕES DA IMPLANTAÇÃO DE AÇÕES DE GESTÃO NO  
AÇUDE EPITÁCIO PESSOA E SEUS IMPACTOS NA CRISE  
HÍDRICA EM CAMPINA GRANDE-PB E REGIÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosires Catão Curi

Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Wilson Fadlo Curi

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2018

## Ficha Catalográfica

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

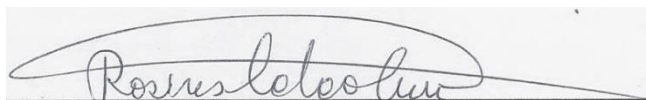
Dátia Paula Marques Maia Lucena

### **SIMULAÇÕES DA IMPLANTAÇÃO DE AÇÕES DE GESTÃO NO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA E SEUS IMPACTOS NA CRISE HÍDRICA EM CAMPINA GRANDE-PB E REGIÃO**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Dissertação aprovada em: 28 de fevereiro de 2018.

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rosires Catão Curi

(Orientadora - Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UFCG)



---

Prof<sup>º</sup>. Dr<sup>º</sup>. Wilson Fadlo Curi

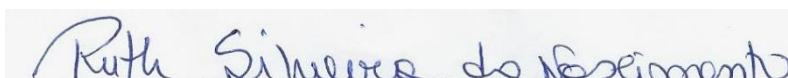
(Coorientador - Unidade Acadêmica de Física – UFCG)



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Márcia Maria Rios Ribeiro

(Examinadora Interna - Unidade Acadêmica de Engenharia Civil – UFCG)



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ruth Silveira do Nascimento

(Examinadora Externa - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UEPB)

Campina Grande – PB

Fevereiro de 2018

## DEDICATÓRIA

*À minha mãe, Manaíra, fonte de minha força e maior  
inspiração, atribuo os méritos dessa conquista e, com  
todo o amor que há em mim, dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela presença constante em minha vida, por todas as oportunidades concedidas, por me guiar em todos os passos dessa caminhada e por me fortalecer nos momentos mais difíceis, quando nem eu achei que conseguiria.

Em especial, à minha mãe, Manaíra Marques Maia Lucena, por ser para mim a própria personificação do amor, por tanta dedicação e pelo incentivo para que eu pudesse concretizar esse sonho. Sem você eu jamais teria chegado até aqui, afinal, “*sonho que se sonha só é só um sonho que se sonha só, mas sonho que se sonha junto é realidade*”, e você, minha mãe, sempre sonhou o meu sonho junto comigo.

Ao meu pai, Damião Bernardo de Lucena Filho (*in memoriam*), mesmo não estando mais entre nós, lembrar da sua torcida e de quão orgulhoso você estaria de mim, me dá forças para seguir em frente.

À toda minha família, pelos bons momentos de descontração compartilhados, os quais renovaram minhas energias quando os tempos estavam sombrios, e por compreenderem minha ausência em momentos importantes.

Aos meus amigos, que sempre me ouviram e me apoiaram, sendo uma verdadeira família quando eu estava longe da minha, trazendo leveza aos meus dias e me ensinando que o que realmente importa nessa vida são as pessoas que a gente encontra pelo caminho e que resolvem seguir conosco a nossa jornada.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Rosires Catão Curi, pela sua competência, estímulo, orientação e confiança para realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Wilson Fadlo Curi, pelos valiosos conselhos e sugestões.

Aos membros da banca examinadora pela dedicação de seu tempo na contribuição deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Laboratório de Hidráulica I e aos amigos da turma de mestrado, especialmente aos que partilharam os mais diversos momentos do dia-a-dia ao longo desses dois anos, pela ajuda e companheirismo em todas as etapas desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte financeiro por meio da bolsa de estudos concedida e à todos que acreditaram e contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste estudo.

**Muito obrigada!**

*“Cada sonho que você deixa para trás, é um pedaço  
do seu futuro que deixa de existir.”*

***Steve Jobs***

## RESUMO

Reservatórios localizados em regiões semiáridas apresentam alta variabilidade nas afluências hídricas, baixas vazões de regularização, comparadas a outros em climas mais úmidos, e são sujeitos a grandes perdas por evaporação, principalmente quando cheios, fazendo com que a gestão efetiva dos mesmos seja de extrema importância. Este trabalho mostra como modelos matemáticos podem ser utilizados como ferramenta de apoio a tomada de decisão na operação de reservatórios e como medidas de gestão podem afetar situações de racionamento e crise hídrica. O caso de estudo dessa pesquisa é o reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão), localizado em Campina Grande-PB, semiárido brasileiro. O açude Boqueirão recentemente enfrentou a maior crise hídrica desde sua construção, uma gestão não otimizada pode ser apontada como uma das causas do agravamento dessa crise hídrica. É proposta uma metodologia que consiste na definição de oito cenários, compostos por ações ou conjunto de ações que poderiam ter sido tomadas em relação à gestão hídrica do manancial. Dentre o conjunto de ações propostas, tem-se ações meramente gerenciais e outras que envolvem a utilização de técnicas de redução de perdas por evaporação. Tais cenários foram simulados no modelo matemático AcquaNet, para um período de 63 meses, para analisar qual ação teria sido a mais benéfica para a população, e como cada conjunto de ações poderiam ter impactado, quantitativamente, a questão do racionamento em Campina Grande e região. Para fazer a análise e comparação desses cenários, foram utilizados índices de sustentabilidade (confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade), bem como os valores dos volumes finais do reservatório e atendimento médio à demanda em cada cenário. A partir destes, foram feitas as comparações entre os cenários para identificação das medidas que causaram maior impacto no sistema. Os resultados encontrados demonstraram que as medidas que incluíram a adoção de técnicas de redução de evaporação na bacia hidráulica do reservatório poderiam ter evitado completamente a adoção do severo racionamento a que a população foi submetida por um longo período de tempo. Adicionalmente, fica demonstrado que modelos matemáticos de simulação podem ser muito úteis na tomada de decisão quanto a gestão de reservatórios em épocas de escassez hídrica, principalmente em regiões de clima árido ou semiárido.

**Palavras-chave:** AcquaNet, operação de reservatórios, gestão dos recursos hídricos, racionamento.



## **ABSTRACT**

Reservoirs located in semi-arid regions present high hydrological variability, low regularization flows, compared to others in more humid climates, and are subject to large evaporation losses, mainly in their periods of high water levels, making their effective management extremely important. This article aims to show how mathematical models can be used as a tool to support decision-making process in the operation of reservoirs and how management measures can affect rationing and water crises. The case study of this research is the Epitacio Pessoa Reservoir (also called Boqueirão), located in the city of Campina Grande-PB, Brazilian semiarid region. The Boqueirão went through the biggest water crisis since its construction, a non-optimized management of these resources can be pointed as one of the causes of these water crisis aggravation. It is proposed a methodology that consists in the definition of eight scenarios, composed by actions or set of actions that could have been taken regarding to the water management of this reservoir during that period. Among the set of actions proposed, there are managing actions and others involving the use of techniques to reduce evaporation losses. The scenarios were simulated with the mathematical model AcquaNet, for a period of 63 months, in order to analyze which action would have been the most beneficial for the population, and how each set of actions could have, quantitatively, affected the water shortage issue in Campina Grande and region. Sustainability indexes (reliability, resilience and vulnerability), reservoir final volumes and average meeting of the water demand requirements, were used to analyze and compare the scenarios. From these results, comparisons were made among the scenarios to identify the measures that would have caused the greatest impact on the system. The results pointed out that measures which included the use of evaporation rates reduction techniques in the reservoir's hydraulic basin could have completely avoided the adoption of severe rationing to which the population was submitted for a long time. In addition, it is demonstrated that mathematical simulation models can be useful in decision-making processes regarding the management of reservoirs in a water scarcity situation, especially in arid or semi-arid climate regions.

**Key words:** AcquaNet, reservoirs operation, water resources management, rationing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço hídrico em reservatório .....	27
Figura 2 - Exemplo de uma curva-guia .....	28
Figura 3 - Variação do volume de água armazenado nos últimos 10 anos .....	39
Figura 4 - Localização do reservatório na bacia do rio Paraíba .....	45
Figura 5 - Medidas tomadas frente a atual crise hídrica.....	47
Figura 6 – Medidas levadas em consideração na elaboração dos cenários simulados ...	54
Figura 7 – Série histórica de vazões afluentes ao açude Epitácio Pessoa .....	66
Figura 8 – Médias mensais de lâminas evaporadas .....	67
Figura 9 – Gráfico da curva cota-área-volume do reservatório Epitácio Pessoa.....	68
Figura 10 – Resultados da simulação do cenário padrão.....	70
Figura 11 - Resultados da simulação do cenário 1 .....	71
Figura 12 - Resultados da simulação do cenário 2 .....	72
Figura 13 - Resultados da simulação do cenário 3 .....	73
Figura 14 - Resultados da simulação do cenário 4 .....	74
Figura 15 - Resultados da simulação do cenário 5 .....	75
Figura 16 - Resultados da simulação do cenário 6 .....	76
Figura 17 - Resultados da simulação do cenário 7 .....	77
Figura 18 - Resultados da simulação do cenário 8 .....	78
Figura 19 - Comparativo entre os volumes finais em m <sup>3</sup> obtidos em cada cenário .....	80
Figura 20 - Comparativo entre os atendimentos médios encontrados em cada cenário .	81
Figura 21 - Comparativo entre as confiabilidades encontradas em cada cenário.....	82
Figura 22 - Comparativo entre as resiliências encontradas em cada cenário .....	82
Figura 23 - Comparativo entre as vulnerabilidades encontradas em cada cenário.....	83
Figura 24 - Comparativo entre as sustentabilidades calculadas para cada cenário .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Panorama dos acontecimentos na crise hídrica de 1997-2000 .....	36
Tabela 2- Características Hidroclimatológicas da Região do Alto Curso da BH do rio Paraíba .....	46
Tabela 3 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário padrão .....	55
Tabela 4 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 1 .....	57
Tabela 5 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 2 .....	58
Tabela 6 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 3 .....	59
Tabela 7 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 4 .....	61
Tabela 8 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 5 .....	62
Tabela 9 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 7 .....	64
Tabela 10 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 8 .....	65
Tabela 11 – Valores da curva cota-área-volume do reservatório Epitácio Pessoa .....	68
Tabela 12 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário padrão .....	69
Tabela 13 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 1 .....	70
Tabela 14 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 2 .....	71
Tabela 15 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 3 .....	72
Tabela 16 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 4 .....	73
Tabela 17 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 5 .....	74
Tabela 18 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 6 .....	75
Tabela 19 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 7 .....	76
Tabela 20 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 8 .....	77
Tabela 21 - Comparativo entre todos os indicadores encontrados em cada cenário simulado .....	85

## LISTA DE SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAGEPA	Companhia de água e esgotos da paraíba
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP-PB	Ministério Público da Paraíba
PERH-PB	Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba
PERH	Política Estadual de Recursos Hídricos
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
SERHMACT	Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente
SIGERH	Sistema Integrado de Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos Específicos .....	18
1.1.3 Organização da Dissertação .....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Gestão dos Recursos Hídricos .....	20
2.2 Política Nacional de Recursos Hídricos .....	22
2.2.1 Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.....	23
2.3 Gestão de Recursos Hídricos no Estado da Paraíba .....	24
2.4 Gestão e operação de reservatórios .....	26
2.5 Indicadores de sustentabilidade em reservatórios .....	29
2.6 Modelos matemáticos como ferramenta de auxílio a gestão de reservatórios .....	31
2.6.1 O modelo matemático ACQUANET.....	33
2.7 Histórico das crises hídricas enfrentadas pelo Açude Eptácio Pessoa ao longo de sua existência.....	35
2.7.1 A crise hídrica de 1997-2000.....	35
2.7.2 A crise hídrica 2012-2017 .....	38
2.8 Técnicas para a redução de evaporação em reservatórios em regiões semiáridas	41
3. METODOLOGIA.....	44
3.1 Caso de Estudo .....	44
3.2 Medidas de gestão implantadas pelos órgãos gestores frente à atual crise hídrica no açude Eptácio Pessoa.....	47
3.3 Resultados da consulta à especialistas para a definição dos cenários a serem simulados.....	48
3.4 Definição dos cenários a serem simulados .....	54

3.4.1 Cenário Padrão .....	55
3.4.2 Cenário 1 .....	56
3.4.3 Cenário 2 .....	57
3.4.4 Cenário 3 .....	59
3.4.5 Cenário 4 .....	60
3.4.6 Cenário 5 .....	61
3.4.7 Cenário 6 .....	63
3.4.8 Cenário 7 .....	63
3.4.9 Cenário 8 .....	64
3.5 Dados de entrada .....	65
3.5.1 Vazões Afluentes .....	66
3.5.2 Evaporação .....	67
3.5.3 Curva cota-área-volume .....	67
4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	69
4.1 Simulação do Cenário Padrão .....	69
4.2 Simulação do Cenário 1.....	70
4.3 Simulação do Cenário 2.....	71
4.4 Simulação do Cenário 3.....	72
4.5 Simulação do Cenário 4.....	73
4.6 Simulação do Cenário 5.....	74
4.7 Simulação do Cenário 6.....	75
4.8 Simulação do Cenário 7.....	76
4.9 Simulação do Cenário 8.....	77
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	79
5.1 Volume final .....	79
5.2 Atendimento médio .....	80
5.3 Confiabilidade .....	81

5.4 Resiliência .....	82
5.5 Vulnerabilidade .....	83
5.6 Sustentabilidade.....	84
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	86
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89

## 1. INTRODUÇÃO

O açude Epitácio Pessoa está situado na zona rural do município de Boqueirão, em plena região semiárida do Nordeste brasileiro, e é o principal reservatório da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Localiza-se em uma região com um dos menores índices pluviométrico do Brasil, com precipitações que variam, na região do reservatório, em torno de 600mm/ano, represando as águas dos rios Paraíba do Norte e Taperoá. Por estar localizado numa região de clima quente e seco, o reservatório é bastante vulnerável às mudanças climáticas e aos impactos antropogênicos.

Atualmente abastece Campina Grande, segunda maior cidade do Estado da Paraíba, e mais 18 cidades localizadas na região circunvizinha, levando água para aproximadamente 700 mil pessoas. Sua capacidade máxima de armazenamento é de 411.686.287 m<sup>3</sup>, mas, entre os anos de 2012 e 2017, passou pela pior seca já enfrentada desde a sua construção, com volumes de chuva muito abaixo da média histórica registrada e, em abril de 2017, atingiu o menor volume armazenado já registrado, de apenas 11,97 milhões de m<sup>3</sup> de água, menos de 3% de sua capacidade total de armazenamento, configurando assim um período de crise hídrica que quase culminou em um quadro de calamidade pública às cidades abastecidas (AESAs, 2017).

Apesar de essa ter sido a maior crise hídrica já enfrentada, ela não foi a primeira, este reservatório já passou por outros episódios de seca e racionamento, como por exemplo, entre os anos de 1997 e 2000, período que também registrou um volume de água armazenada muito abaixo, de apenas 64 milhões de m<sup>3</sup> de água, o que equivale a 15,6% da sua capacidade total de armazenamento (AESAs, 2018). Estudos feitos na época por Rêgo *et al.* (2000 e 2001), observaram a falta de uma gestão adequada dos recursos hídricos como possível causa do agravamento daquela crise hídrica, fato que se repetiu na crise 2012-2017. Esse fato, associado a sequência de anos secos iniciada em 2012 e aos altos índices de evaporação da região semiárida onde o reservatório se localiza, podem ser apontados como os principais responsáveis pela configuração da crise hídrica foco de estudo deste trabalho.

É sabido que a gestão eficiente dos recursos hídricos é condição básica para o uso adequado e criterioso desse recurso tão importante e escasso, principalmente em regiões de baixa disponibilidade hídrica e alta demanda, como é o caso do semiárido nordestino. Nessas regiões, a escassez de água, que ocorre devido ao mau uso das fontes existentes



aliado à variabilidade climática (baixas precipitações e ocorrência de secas periódicas), torna-se mais grave pela carência de uma gestão efetiva e afeta social e economicamente a população (GUIMARÃES *et al.*, 2005).

A região em estudo é caracterizada por altas taxas de evaporação e chuvas irregulares, tanto espacial quanto temporalmente, portanto, existe uma grande insegurança no que diz respeito ao abastecimento da população que vive nestas áreas. A evaporação é uma variável crítica dentro do balanço hídrico de reservatórios com essas características, estudos realizados em diversas regiões do semiárido nordestino, apontam que cerca de 40% das águas acumuladas em reservatórios de pequeno porte se perde através do processo evaporativo (SUASSUNA, 2002). Percebe-se então a relevância de estudos de técnicas que possibilitem minimizar as perdas evaporativas em reservatórios nessas áreas, bem como, é nessa região onde a gestão dos recursos hídricos é ainda mais complexa e necessária, pois o gestor deve considerar as particularidades climáticas, pedológicas e geológicas e demais características das bacias hidrográficas dessas regiões.

Em consequência dos avanços tecnológicos, especialmente na área da informática, atualmente existem inúmeras ferramentas computacionais disponíveis para auxiliar pesquisadores e profissionais da área na construção de modelos, tanto de simulação quanto de otimização, que facilitam a tomada de decisão quanto a problemas relacionados ao abastecimento de água. Esses modelos matemáticos podem ser utilizados por gestores, responsáveis pela operação de reservatórios, como aliados na tomada de decisão frente à uma situação de crise hídrica em regiões abastecidas por reservatórios, por exemplo.

Dentro desse contexto, o desenvolvimento e a aplicação de modelos de gestão que consideram aspectos de quantidade e qualidade de água são bastante necessários para resolver ou atenuar o problema da crise hídrica de maneira racional, este trabalho se concentra nos aspectos de quantidade, utilizando o modelo matemático AqquaNet para o desenvolvimento de sua metodologia. O mesmo foi elaborado para resolução de problemas de distribuição de água em bacias hidrográficas, utilizando um algoritmo de balanço hídrico para simulação e um algoritmo para otimização, baseado em redes de fluxo, para otimizar a alocação de água. Permite representar um sistema composto por vários elementos, com suas respectivas demandas e afluências, de modo simples e bem detalhado. (ALBANO e PORTO, 2003).

Desta forma, o objetivo do presente trabalho consiste na investigação de medidas de gestão preventiva que poderiam ter sido tomadas frente a atual crise hídrica que viessem a impactar, de forma positiva, o racionamento em Campina Grande e região

circunvizinha. Para isso, foi utilizado o modelo matemático AcquaNet na simulação do comportamento do manancial Epitácio Pessoa, tendo em vista que este apresenta conflitos pelo uso da água, relacionados à sua escassez. Foram elaborados oito cenários, visando a atenuação dos impactos da crise enfrentada, de acordo com a opinião de especialistas da região, de diversas áreas do conhecimento, relacionadas aos recursos hídricos e ao tema da investigação e utilizando também a aplicação de técnicas de redução de evaporação. Estes cenários são compostos de ações ou conjunto de ações que poderiam ter sido tomadas em relação ao uso racional dos recursos hídricos do açude Epitácio Pessoa durante a época de crise hídrica, com o intuito de verificar qual ação teria sido a mais eficaz, e como cada conjunto de ações poderiam ter impactado, quantitativamente, o problema do racionamento de água em Campina Grande e região circunvizinha.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Investigar como cada cenário, definido como uma ação ou um conjunto de ações de Gestão que poderiam ter sido tomadas com relação à crise hídrica 2012-2017 no açude Epitácio Pessoa, poderia ter impactado nos efeitos da referida crise em Campina Grande e região, utilizando o modelo matemático de simulação AcquaNet.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Verificar as ações de gestão que foram adotadas no cenário real da crise hídrica em estudo;
- ✓ Propor cenários de gestão, constituídos por uma ação ou um conjunto de ações de Gestão que poderiam ter sido tomadas com relação à crise, cenários esses propostos a partir de consulta a especialistas e levando em consideração a utilização de técnicas de redução de evaporação;
- ✓ Simular o efeito desses cenários utilizando o modelo matemático AcquaNet;
- ✓ Analisar os resultados obtidos nas simulações dos cenários e, utilizando índices de sustentabilidade, verificar quais cenários teriam obtido melhores resultados e como cada conjunto de ações poderiam ter impactado, quantitativamente, no problema da escassez de água em Campina Grande e região circunvizinha;

- ✓ Através da análise dos resultados encontrados e com base nos cenários simulados, propor ações de gestão que visem diminuir os problemas relativos a crises hídricas, em futuros casos de escassez semelhantes ao atual.

### 1.1.3 Organização da Dissertação

A dissertação é composta por esta Introdução e mais cinco capítulos, descritos a seguir.

Capítulo 2 – Revisão de Literatura: Com a abordagem de aspectos relativos à gestão de recursos hídricos no Brasil e na Paraíba, gestão e operação de reservatórios, com ênfase na utilização da modelagem matemática como ferramenta de auxílio à gestão, histórico das crises hídricas já enfrentadas pelo açude Epitácio Pessoa e a utilização de técnicas de redução de taxas evaporativas em reservatórios localizados em região com clima semiárido.

Capítulo 3 – Metodologia: Consistindo na apresentação da metodologia utilizada na elaboração da dissertação, contendo o caso de estudo, a definição dos cenários que foram simulados, os dados de entrada no modelo e os passos para chegar aos resultados do trabalho.

Capítulo 4 – Resultados das simulações: Neste capítulo, são mostrados os cenários que foram simulados utilizando o AcquaNet, na sequência, apresentados os resultados obtidos com essas simulações.

Capítulo 5 – Análise dos Resultados: Onde foram calculados os índices de sustentabilidade para cada um dos oito cenários e, a partir disso, foram discutidos e analisados os resultados obtidos com as simulações, buscando identificar os impactos e de cada cenário na situação de crise estudada.

Capítulo 6 – Conclusões: Neste capítulo, conforme estabelecido nos objetivos geral e específicos deste trabalho, e através da análise dos resultados obtidos, são propostas ações de gestão, baseadas nos cenários simulados, que visem diminuir os problemas relativos a escassez em futuros casos de crise hídrica semelhantes ao atual.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Gestão dos Recursos Hídricos**

O uso principal da água é o abastecimento humano, mas além disso, a água é um recurso fundamental para o desenvolvimento de diversas atividades, tais como produção de energia, produção industrial, produção agrícola, transporte de cargas, lazer, além de servir como fonte para a vida animal e de habitat para a vida aquática. Em adição a todos esses usos, os recursos hídricos ainda vêm sendo erroneamente utilizados como local para despejo de resíduos das mais diversas origens, o que tem comprometido a sua qualidade. A diminuição da quantidade e a deterioração da qualidade da água afeta a saúde e a vida de todos que fazem uso dela de uma maneira geral, além de afetar o equilíbrio ambiental local. Nesse contexto, uma gestão eficaz dos recursos hídricos é imprescindível para que os mesmos possam permanecer fornecendo benefícios econômicos, sociais e ambientais aos seus usuários.

A Gestão de Recursos Hídricos é baseada na elaboração de fundamentos e diretrizes através de documentos que normalizam e orientam a estruturação de sistemas de gerenciamento com o intuito de nortear a tomada de decisões de forma racional e que proporcione os usos múltiplos dos recursos hídricos, com o intuito de garantir o uso sustentável das águas e também o aprimoramento de técnicas que alcancem a reutilização de águas impróprias para o consumo humano/animal. (BAKKER, 2012; SILVA, 2014).

Um planejamento integrado de gestão dos recursos hídricos busca atingir um patamar de aproveitamento, controle e conservação das águas, tendo como foco principal a busca pelo equilíbrio entre a qualidade e a quantidade da água. Dada a diversidade existente de usuários e partes interessadas, a gestão integrada tornou-se um padrão, cujo maior desafio é atender todas as demandas de maneira otimizada, fixando num planejamento integrado e racional na alocação da água a fim de atender os usos múltiplos de forma eficiente, focando na centralização do planejamento e gerência da oferta (CHARNEY, 2011; ARAÚJO et al., 2015).

É sabido que a gestão dos recursos hídricos é condição básica para o uso adequado e criterioso desse recurso tão importante e escasso, com a verificação do uso intensivo dos recursos hídricos faz-se necessário à implementação de uma eficiente gestão, através do estabelecimento de políticas, leis e normativos oriundos dos órgãos competentes, além do estímulo a participação da sociedade de forma integrada (COSTA *et al.*, 2009).

Em uma região caracterizada pelas altas taxas de evaporação e chuvas irregulares espacial e temporalmente, como o semiárido, existe uma grande insegurança no que diz respeito ao abastecimento da população que vive nestas áreas. É, então, nessa região onde a gestão dos recursos hídricos é ainda mais complexa e necessária, pois o gestor deve considerar as particularidades das características das bacias hidrográficas dessas regiões. Geralmente, essas localidades são atendidas por mananciais superficiais que, apesar de possuírem grande capacidade de armazenamento, suas vazões de regularização, que são as vazões máximas que os reservatórios podem disponibilizar constantemente sem que haja risco de falhas no atendimento, mesmo que ocorram longos períodos de escassez, são muito pequenas, dificultando o atendimento aos múltiplos usuários, tais como abastecimento urbano, irrigação, geração de energia hidrelétrica, produção agrícola, piscicultura, entre outros.

O mais importante marco regulatório na gestão dos recursos hídricos no Brasil é a Lei 9.433/97, que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), um sistema integrado e participativo de gerenciamento dos mesmos, havendo assim um grande impulso ao processo de gestão das águas no Brasil, após esse marco regulatório.

De acordo com Jacobi (2005), a partir daí a água deixa de ser considerada exclusivamente uma questão técnica, externa à sociedade, um recurso infinito e de exclusiva competência de peritos.

Costa *et al.* (2009) afirmam que a Lei das Águas trouxe inovação e modernidade à gestão dos recursos hídricos, através da inserção dos princípios e fundamentos, objetivando a real implementação dos instrumentos de gestão.

De acordo com Silveira (2005), a Lei 9.433/97 introduziu um novo paradigma à gestão hídrica, destacando-se o princípio da descentralização da administração de recursos hídricos, com a participação dos governos, dos usuários e das comunidades no processo de tomada de decisões.

No Estado da Paraíba, a Lei 6.308/96 institui a Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH) que tem como finalidade principal, fundamentar e orientar a implementação dos demais instrumentos de gestão dos recursos hídricos, previstos na Lei 9.433/97, em consonância com a Legislação Estadual.

## **2.2 Política Nacional de Recursos Hídricos**

De acordo com a Constituição Federal de 1988, os recursos ambientais são bens da União ou do Estado e do Distrito Federal, de uso comum do povo. A Constituição Federal deixa expresso que este é bem de uso comum do povo e que não pertence a entidades privadas ou públicas, mas sim a toda uma coletividade indeterminada. Ou seja, isto não transforma o Poder Público Federal em “proprietário” dos recursos ambientais, mas sim em gestor desse bem, em benefício e interesse de todos. Deste modo, a água, como sendo elemento que compõe o meio ambiente, é um bem de uso comum do povo (SOUZA, 2009).

A promulgação da Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), surge como principal avanço para a gestão dos recursos hídricos no nosso país, com ela houve um grande impulso ao processo de gestão das águas no Brasil. Esta Lei trouxe para o cenário hídrico brasileiro perspectivas sob o paradigma da sustentabilidade, que influencia a difusão de uma visão menos utilitarista dos recursos hídricos, fruto das discussões iniciadas na escala internacional. Este novo paradigma fortalece a aceitação da água como um bem que apesar de renovável deve ser gerido no interesse dos diferentes usos e usuários, presentes e futuros (SANTOS & GUSMÃO, 2013).

Brito (2017) destaca que a PNRH norteia o processo de gestão dos recursos hídricos brasileiros, processo esse que deve ocorrer no âmbito da bacia hidrográfica, com um enfoque descentralizado e participativo, envolvendo representantes do Poder Público, dos usuários e das comunidades. Esse processo promove a integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental e a articulação da gestão dos recursos hídricos com a do uso do solo. Dentre seus objetivos podemos destacar:

I. Assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;

II. A utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;

III. A prevenção e a defesa contra eventos críticos de origem natural ou decorrente do uso integrado dos recursos hídricos.

Com o intuito de atingir esses objetivos propostos, uma série de princípios devem ser adotados, como destacado na Lei:

- I. A água é um bem de domínio público;
- II. A água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III. Em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV. A gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V. A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- VI. A gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

A Lei das águas estabelece que a dominialidade das águas brasileiras cabe à União, aos Estados e ao Distrito Federal: são bens da União os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham; são bens dos estados ou do Distrito Federal as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, na forma da lei, as decorrentes de obras da União (BRASIL, 1997).

#### 2.2.1 Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) tem como objetivos principais coordenar a gestão integrada das águas, arbitrar, no âmbito administrativo, os conflitos relacionados com os recursos hídricos, e planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos, permitindo que a União, os estados, os municípios, os usuários de recursos hídricos e a sociedade civil atuem de forma harmônica e integrada (Lei 9.433/1997).

O SINGREH é uma estrutura capaz de atuar nos níveis federal, estadual e de bacia, que possibilita a implementação da PNRH e engloba organismos, agências e instituições governamentais, como o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Agência Nacional das Águas (ANA), os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal, os Comitês de Bacia Hidrográfica (CBH), os órgãos dos poderes públicos federal, estadual, do Distrito Federal e municipal cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos e as agências de águas.

Através da PNRH, cada uma dessas instituições desempenha um papel no que diz respeito ao gerenciamento dos recursos hídricos, dentre essas atribuições, destacam-se: promover a articulação do planejamento de recursos hídricos com os planejamentos nacional, regional, estaduais e dos setores usuários; arbitrar, em última instância administrativa, os conflitos existentes; aprovar a criação de comitês de bacias que envolvam rios de domínio federal, as propostas dos planos de recursos hídricos e os valores de cobrança pelo uso da água; promover um fórum de discussão de decisões no âmbito da bacia; aprovação do Plano da Bacia e do mecanismo de cobrança pelo uso da água; supervisionar, controlar e avaliar as ações e atividades relacionadas aos recursos hídricos; outorgar o direito pelo uso da água; arrecadação dos recursos da cobrança pelo uso da água em rios de domínio da União; elaboração e implementação do Plano de Recursos Hídricos da Bacia, o gerenciamento dos recursos oriundos da cobrança pelo uso da água e dos demais recursos destinados à gestão (RIBEIRO, 2012).

A PNRH institui ainda instrumentos de gestão de recursos hídricos, são eles: Planos de Recursos Hídricos que constituem um documento programático que define a agenda de recursos hídricos de uma região, visando fundamentar e a orientar a implementação da política e o gerenciamento desses recursos; Enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água, buscando assegurar que a qualidade da água seja compatível os usos mais exigentes a que forem destinadas e diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes; Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, pela qual o Poder Público autoriza o usuário a utilizar determinado volume de água sob sua dominialidade por período pré-determinado, nos termos e nas condições expressas em ato administrativo; Cobrança pelo uso de recursos hídricos, estão sujeitos à cobrança pelo uso dos recursos hídricos todos os usuários passíveis de serem outorgados; e Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, que consiste em um instrumento de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão (MMA, 2006; CONAMA, 2008; ANA, 2013).

### **2.3 Gestão de Recursos Hídricos no Estado da Paraíba**

A maior parcela do território do Estado da Paraíba está inserida numa região de clima semiárido, caracterizado por baixo volume pluviométrico, chuvas irregulares, altas taxas de evaporação, rios intermitentes e grandes reservatórios para o abastecimento



público. Aliadas a estas condições climáticas, as dificuldades enfrentadas no gerenciamento das demandas de água no Estado impulsionaram a criação da Lei paraibana das águas.

Em 1996, teve início a gestão das águas na Paraíba, com a promulgação da Lei 6.308/96, que estabelece a Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH). A Política Estadual de Recursos Hídricos tem como objetivo principal garantir o bem-estar da população através do incentivo ao uso racional e integrado desses recursos. Pode-se destacar entre os princípios fundamentais da Lei Estadual: o acesso aos recursos hídricos como direito de todos, atendendo às necessidades essenciais humanas; a natureza dos recursos hídricos, que deverão ser tratados como bem público, de valor econômico, e cuja utilização deve ser tarifada; a consideração da bacia hidrográfica como unidade básica físico-territorial de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos; a determinação de que o gerenciamento deverá ser realizado de forma participativa e integrada, considerando os aspectos quantitativos e qualitativos dos recursos hídricos; e a elaboração de um Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH-PB, onde são determinados os Instrumentos de Execução e aos Instrumentos de Gerenciamento.

De acordo com Vieira e Ribeiro (2007), estes princípios estão de acordo com as diretrizes da Lei nº 9.433/1997, exceto no que se refere à descentralização, presente na lei federal, mas ausente na estadual, e a forma como a lei apresenta seus princípios, excluindo o enquadramento dos corpos d'água e o sistema de informações sobre os Recursos Hídricos.

Impulsionada pelos princípios estabelecidos pela PNRH e pela PERH, em 2007, houve a divulgação final do PERH-PB por parte da AESA, com modificações significativas, que tiveram como objetivo fazer com que os princípios da Lei Estadual (6.308/96) estivessem em consonância com o que preconiza a Lei nacional (9.433/97). Ainda segundo Vieira e Ribeiro (2007), apesar do alto nível dos estudos realizados na elaboração do PERH-PB, o plano apresentou algumas falhas, como por exemplo: não mencionar os conflitos relacionados aos recursos hídricos, já existentes nas bacias do estado; a falta de critérios e diretrizes para alocação da água aos múltiplos usuários; a indefinição de prioridades na concessão de outorgas de direito do uso da água nas bacias do estado; e a falta de diretrizes e critérios para instituir a cobrança pelo uso da água no estado.

## 2.4 Gestão e operação de reservatórios

O abastecimento urbano de água em Bacias hidrográficas com alta variabilidade hidrológica, que têm como principais características precipitações irregulares no tempo e no espaço e altos índices de evaporação, na maioria das vezes é efetuado por meio da utilização de grandes reservatórios, de modo a possibilitar o atendimento à população mesmo durante os meses ou anos de estiagem. Este é o caso das bacias hidrográficas de regiões semiáridas, como a região onde se localiza a bacia hidrográfica do Rio Paraíba, onde está inserido o reservatório Eptácio Pessoa, caso de estudo desta pesquisa.

De acordo com Collischonn (2013), a construção de um reservatório, por meio do represamento de um corpo hídrico, tem como objetivo principal garantir uma vazão constante, acima da vazão mínima natural, garantindo assim, que regiões de cursos d'água intermitentes possam ter água para consumo durante os meses ou anos de escassez. Todas as peculiaridades que podem interferir tanto na construção quanto na operação do mesmo, tais como geologia e climatologia da bacia, relevo e demandas, devem ser consideradas ao se projetar e operar um reservatório. A operação de um reservatório é o setor responsável pela efetiva liberação da água para o atendimento às demandas outorgadas, atividade que deve ser rigorosamente fiscalizada pelo órgão gestor, a fim de garantir que sejam respeitadas as outorgas de uso da água.

A operação de reservatórios envolve muitas variáveis e múltiplos objetivos. Desta forma, utilizar regras de operação fixas, para reservatórios em regiões semiáridas, pode gerar, por um lado, grandes volumes de água extravasados e perdas consideráveis de água por evaporação, se a utilização da água for muito conservadora; ou, por outro lado, risco de colapso do sistema de abastecimento, caso a liberação de água seja excessiva. Na maioria das vezes, a operação dos reservatórios é realizada levando em consideração apenas as questões econômicas, sem dar a devida atenção as particularidades do sistema e aos prejuízos que podem ser gerados pela falta de gestão (NUNES, 2015).

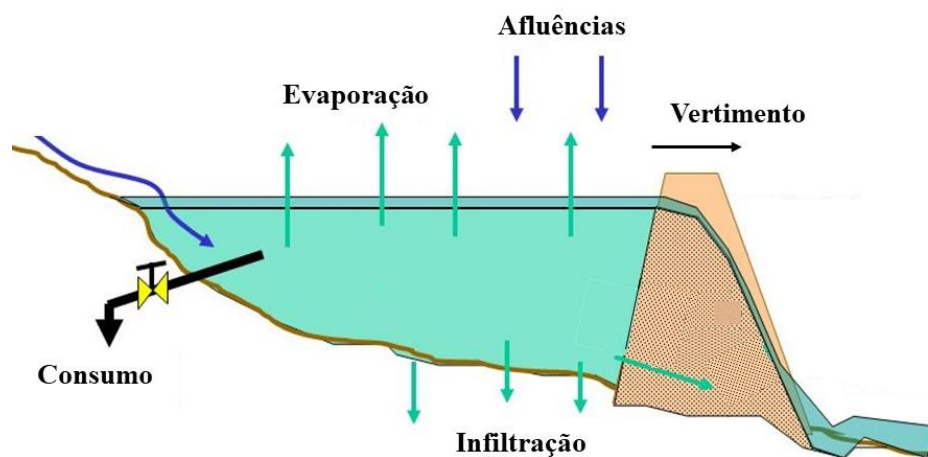
Outro fator que deve ser levado em consideração na operação de reservatórios de abastecimento no semiárido é a construção, sem autorização dos órgãos competentes, de pequenos e médios açudes nas bacias hidrográficas, a montante dos reservatórios principais. Muitos proprietários rurais constroem esses pequenos açudes, com considerável capacidade de retenção de água, e essas construções interferem significativamente na recarga dos reservatórios de maior porte, uma vez que a água que chegaria até os reservatórios maiores, que abastecem a maior parte da população da

região, fica retida nestes reservatórios menores, que são utilizados para o abastecimento de um pequeno grupo de pessoas. Esse quadro é ainda agravado pelo fato de que a taxa de evaporação, que nessa região é muito alta, ao incidir sobre esses pequenos açudes favorece a rápida evaporação da água retida nos mesmos, reduzindo sobremaneira a sua disponibilidade.

A operação de um reservatório deve ser feita com base em estudos das características do mesmo, levando em conta as particularidades climáticas, estruturais e sociais, para que o planejamento do uso da água seja o mais eficiente possível. Dessa forma, faz-se necessário o uso de ferramentas que auxiliem o operador nas tomadas de decisão. Modelos matemáticos de simulação e de otimização são amplamente utilizados para o desenvolvimento dessas ferramentas, oferecendo suporte técnico ao operador na tomada de decisão.

O modelo de simulação mais simples e, por isso, muito utilizado para estudo de sistemas hídricos é o balanço hídrico (Figura 1), que consiste basicamente no balanço entre as entradas do sistema (afluências) e as saídas do sistema (infiltração, evaporação, vertimento e retiradas para consumo).

**Figura 1 - Balanço hídrico em reservatório**



Fonte: Autora.

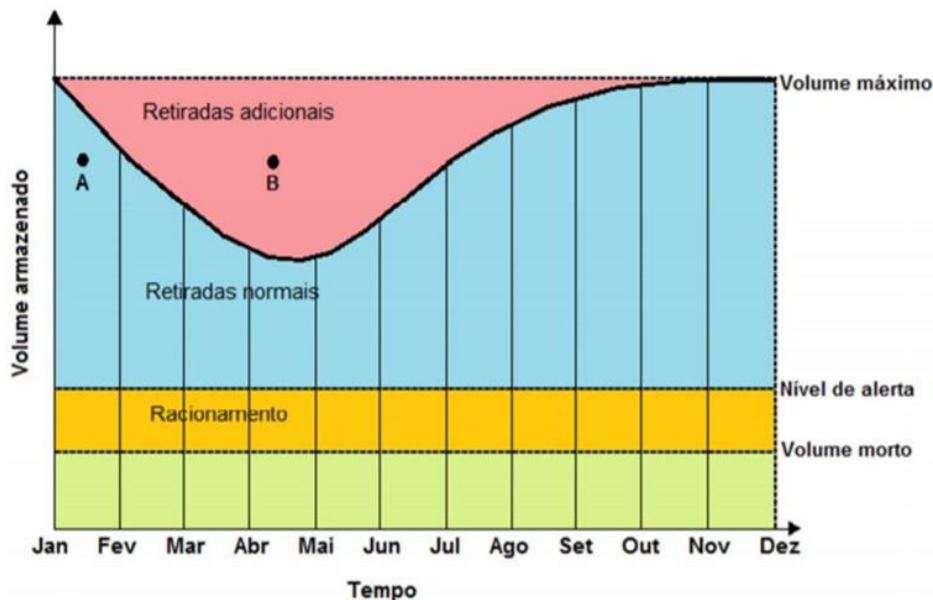
Existem outras metodologias que são utilizadas na operação de reservatórios. Segundo Bravo *et al.* (2006), uma das técnicas mais utilizadas inclui a divisão do volume útil do reservatório em diferentes zonas que possuem regras de operação diferenciadas. A distribuição do volume útil do reservatório nessas zonas pode ser constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal. Essas regras de operação são chamadas de

curvas-guia e são usadas para indicar volumes, e consequentemente, níveis de água, alvos ou ideais do reservatório visando determinados objetivos.

Nas regiões com alta variabilidade hidrológica, a curva-guia, quando usada para conservação de água, tem por base a moderação do uso/fornecimento do recurso durante períodos nos quais o reservatório atinge determinados níveis de armazenamento (níveis de alerta), permitindo que haja água para ser utilizada caso ocorra uma estiagem prolongada. Essa redução do fornecimento acontece de forma gradual, com o intuito de evitar que os usuários venham a ficar sem água repentinamente. As curvas-guias também são eficazes e podem ser utilizadas no controle de cheias, limitando o armazenamento de água no reservatório a um nível máximo (BACALHAU, 2015).

As curvas-guia facilitam o entendimento do assunto pois são capazes de expressar a estratégia de operação do reservatório de uma forma visual, facilitando suas execuções na prática. Exemplos de curvas-guia podem ser vistos na Figura 2, um exemplo variando sazonalmente, para contenção de cheia, e outra constante ao longo do ano, representando uma situação de racionamento de água, onde os níveis de alerta são alcançados.

**Figura 2** - Exemplo de uma curva-guia



Fonte: Nunes, 2015.

Para o modelo de curva-guia adotado no exemplo da Figura 2, quando o volume armazenado estiver abaixo da curva-guia de contenção de cheia e acima do nível de alerta, o reservatório deve operar normalmente - volume em azul. Caso o reservatório chegue ao nível armazenado acima da curva-guia, deve-se liberar água por vertimento - volume em

rosa - de modo que, em caso de grandes afluências na bacia hidrográfica, a água seja retida pelo reservatório, evitando, por exemplo, que as cidades a jusante sofram com enchentes. Pode-se observar que os pontos A e B, mesmo estando na mesma cota, indicam operações distintas, uma vez que a curva-guia é sazonal. O ponto A pertence a um mês que permite que o reservatório esteja com um maior volume armazenado, uma vez que, o mês de janeiro não recebe grandes afluências. Enquanto o ponto B, encontra-se em um mês que pode receber grandes volumes de água, principalmente por causa do alto volume de precipitação típico para esse período do ano, sendo indicado para este caso o vertimento. Caso o nível do reservatório fique abaixo do nível de alerta - volume em amarelo - as vazões retiradas deverão sofrer reduções, de maneira que o horizonte de atendimento às demandas seja ampliado. O volume em verde representa o volume morto, também chamado de reserva técnica de água, que é a parcela da água que fica abaixo da captação por gravidade. Por se tratar de uma área mais funda, abaixo do nível de captação, serve de zona de sedimentação de micro poluentes e de alguns metais pesados, tendo em vista que o escoamento da água dentro do reservatório de uma barragem tem velocidades muito mais baixas do que o escoamento em um trecho de rio. Com velocidades baixas, a maioria das partículas dissolvidas na água afundam e se acumulam no fundo, deteriorando a qualidade da água nessa faixa do reservatório. Portanto, teoricamente, a água acumulada nessa área não deve ser usada para consumo humano, pois pode apresentar má qualidade por acumular sujeira e substâncias tóxicas, caso haja necessidade de uso, a água do volume morto deve passar por tratamento adequado antes de ser utilizada para abastecimento da população.

## **2.5 Indicadores de sustentabilidade em reservatórios**

Pode-se definir indicador como uma ferramenta que permite a obtenção de informações sobre uma dada realidade que se deseja estudar. Um indicador é uma medida que resume informações relevantes de um determinado fenômeno, com o objetivo de agrupar e quantificar as informações de modo que sua significância se torne mais aparente (GALLOPIN, 1996).

Num sentido mais amplo, os indicadores de sustentabilidade podem ser definidos como a separação ou a combinação de medidas estatísticas de vários critérios previamente estabelecidos, com valores que podem ser expressos tanto quantitativamente quanto qualitativamente (fraco, médio, bom, excelente), que contribuem para a sustentabilidade

do sistema em estudo e são determinados a partir de séries de dados temporais (SANTOS, 2009).

No que diz respeito ao estudo de recursos hídricos e reservatórios, esses indicadores tem como objetivo indicar o comportamento do sistema em resposta a fatores externos e monitorar a saúde do sistema, indicando ou prevendo situações de falha, para que seja possível remediar o problema de maneira eficaz (GANOULIS, 1994).

Neste contexto, pode-se destacar os indicadores de sustentabilidade definidos por HASHIMOTO *et al.* (1982), confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Tais indicadores, utilizam critérios desenvolvidos para medir o desempenho de um sistema, especialmente em períodos críticos como eventos de seca e fornecem meios de avaliar os efeitos das várias regras de operação, além de auxiliar na avaliação de futuros projetos a serem implantados.

Neste estudo, o desempenho do sistema em cada um dos oito cenários é avaliado por indicadores que medem o grau de atendimento aos objetivos: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, propostos por HASHIMOTO *et al.* (1982).

A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um sistema atender a uma demanda de água e mede a probabilidade de a série temporal permanecer em estado satisfatório durante o horizonte de operação, ou seja, a percentagem do tempo em que o sistema funciona sem falhas, onde falhas são definidas como meses nos quais a população está submetida a racionamento. É um conceito que tem sido amplamente utilizado em técnicas de dimensionamento de reservatórios, onde é mais conhecido como garantia, e pode ser calculado da seguinte forma:

$$\text{Confiabilidade} = \frac{\text{número de meses sem falhas na simulação}}{\text{número total de meses na simulação}} \quad (1)$$

A resiliência é um indicador de velocidade de recuperação de uma condição insatisfatória de um sistema, mede a forma como o sistema recupera-se de uma falha, uma vez que esta tenha ocorrido. Resiliência também é definida como o inverso do valor esperado do tempo em que o sistema permanece em estado insatisfatório, logo, um sistema resiliente é aquele capaz de retornar a um estado satisfatório a partir de um estado de falha. Pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{Resiliência} = \frac{\text{número de grupos com falhas na simulação}}{\text{número de meses com falha na simulação}} \quad (2)$$

Onde o número de grupos com falha é definido como o número de grupos de meses consecutivos nos quais o sistema apresentou falhas. Tendo em vista que, no sistema estudado, o reservatório quando apresentou falhas não mais saiu dessa condição, o número de grupos com falhas usado nas simulações foi igual a 1. Quanto mais próximo de 1, melhor será considerada a resiliência do sistema.

A vulnerabilidade, ou percentual volumétrico de falha, mede a magnitude da falha, quando esta ocorre. A vulnerabilidade está relacionada com a magnitude volumétrica dos eventos de seca e mede quão danosos são esses eventos para o sistema e pode ser definida da seguinte maneira:

$$\text{Vulnerabilidade} = \sum \left( \frac{\text{porcentagem de falha} \times \text{número de meses com essa falha}}{\text{número total de meses com falha na simulação}} \right) \quad (3)$$

Onde a porcentagem de falha é definida como a porcentagem da demanda inicial utilizada para abastecimento humano que foi reduzida em consequência da tomada de cada medida de gestão na simulação do cenário.

A Sustentabilidade é um índice definido por Loucks (2000), que combina os critérios de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade com o objetivo de conseguir uma visão mais abrangente do funcionamento do sistema em estudo e pode ser calculado como abaixo equacionado:

$$\text{Sustentabilidade} = \text{Confiabilidade} \times \text{Resiliência} \times (1 - \text{Vulnerabilidade}) \quad (4)$$

## 2.6 Modelos matemáticos como ferramenta de auxílio a gestão de reservatórios

Em consequência dos avanços tecnológicos, especialmente na área dos sistemas de suporte à tomada de decisão, atualmente existem inúmeras ferramentas disponíveis para auxiliar pesquisadores e profissionais na construção de modelos, tanto de simulação, quanto de otimização, que facilitam a resolução de problemas relacionados ao abastecimento de água. Esses modelos matemáticos podem ser então utilizados por gestores, responsáveis pela operação de reservatórios, como aliados na tomada de decisão frente à uma situação de crise hídrica em um reservatório, por exemplo.

Uma técnica que pode ser utilizada como ferramenta de auxílio a tomada de

decisão na gestão de recursos hídricos é a simulação matemática através de modelos de rede de fluxo. A simulação é uma representação matemática dos fenômenos físicos que ocorrem em um sistema e tem como finalidade estudar o seu comportamento sob determinadas condições iniciais. Para Santos (2007), a simulação é mais apropriada para análise de desempenho de alternativas operacionais de longo prazo e representa a operação do sistema com um melhor grau de segurança, pois, embora a simulação não forneça uma solução ótima de imediato, ela pode permitir uma representação muito mais detalhada e próxima da realidade do sistema. Ela ainda possibilita a modificação das variáveis de entrada e de políticas de operação, com isso o gestor pode obter resultados bem próximos dos valores ótimos, onde essa solução é alcançada pelo processo de tentativa e erro.

Braga *et al.* (1998) definem a simulação como uma técnica de modelagem usada para aproximar a situação física de uma realidade computacional, representando as características mais usuais do sistema por equações algébricas. Seu objetivo é representar a operação do sistema de forma mais detalhada possível e fornecer informações para avaliar o comportamento do sistema real. A vantagem das técnicas de simulação está no fato de ser aplicável a sistemas complexos. A desvantagem é que não determina a política ótima de operação.

Com relação à quantidade de água, um modelo de simulação pode ter o seguinte funcionamento:

- Entrada de dados controláveis ou variáveis de decisão (ex.: volume operacional de uma represa, vazões de entrada e saída) e dados não-controláveis (ex.: geometria de uma represa, vazões naturais afluentes);
- Aplicação das equações (por exemplo, a da continuidade) com atendimento à descrição do sistema (equação do sistema), às restrições (ex.: vazões mínimas e máximas, volumes mínimos e máximos armazenados) e à política de operação;
- Saídas (volumes armazenados, vazões descarregadas, de retirada e de transferência) na forma de gráficos ou tabelas descrevendo as frequências de falha e de atendimento;
- Tomada de decisão do operador face a resposta do modelo ou nova simulação com variação de cenários.

A simulação matemática tem como principal vantagem a flexibilidade em representar sistemas simples e sistemas complexos na forma de modelos computacionais. A modelagem em rede de fluxo permite a tomada de decisão através de um conjunto de



soluções viáveis.

Em geral, os modelos de simulação de rede de fluxo formam um conjunto de nós (nodes) e arcos (ou links). Nos sistemas de recursos hídricos os nós representam represas, demandas de cidades, de indústrias e da agricultura, dentre outros pontos importantes do sistema; os arcos são as conexões entre os nós formados por adutoras, canais, túneis e trechos naturais ou artificiais de rios. De maneira geral, cada link tem um limite inferior, um superior (ex.: vazões mínimas e máximas de transferência) e um custo de passagem, fixado pelo usuário; os nós têm um limite superior e um inferior (níveis mínimos e máximos de represas).

#### 2.6.1 O modelo matemático ACQUANET

O modelo de simulação em recursos hídricos escolhido para essa pesquisa foi o AcquaNet, pois ele permite representar um sistema composto por vários elementos, com suas respectivas demandas e afluências, de modo simples e bem detalhado, através de um modelo de redes de fluxo. Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos que utilizaram esse modelo como ferramenta de suporte para desenvolver suas metodologias, como os que seguem.

O AcquaNet foi utilizado por Celeste (2006) para verificar o comportamento, em longo prazo, de seis reservatório localizados na bacia do rio Piancó na Paraíba.

Andrade (2006) utilizou o modelo na bacia do rio Capibaribe em dois sistemas hídricos separados. Através resultados encontrados com a utilização do AcquaNet, foi possível analisar os indicadores de sustentabilidade do sistema. O esquema metodológico adotado mostrou-se adequado e os resultados alcançados são interessantes subsídios para o processo decisório para melhoria da eficiência do uso da água.

Barbosa (2008) fez simulações utilizando o AcquaNet como ferramenta de apoio ao planejamento sobre a bacia do rio Capibaribe-PE, além de examinar as formas ótimas de alocação sustentável da água do sistema, com a finalidade de garantir os múltiplos usos.

Aragão (2008) aplicou o AcquaNet na avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica da transposição das águas do rio São Francisco na bacia do rio Paraíba na Paraíba e concluiu que o maior ganho sinérgico ocorreu quando a transposição das águas do São Francisco foi realizada por adutoras.

Farias (2009) fez uso do AcquaNet no desenvolvimento de sua metodologia para

estudar o comportamento das perdas em trânsito por infiltração e as perdas por evaporação e vertimento em reservatórios em série.

O modelo foi desenvolvido originalmente por John W. Labadie e conhecido primeiramente como MODSIM<sup>35</sup>. O ACQUANET foi elaborado para resolução de problemas de alocação de água em bacias complexas, utilizando um algoritmo de balanço de massa para simulação e um algoritmo para otimização (ALBANO e PORTO, 2003).

Dentre as principais características do ACQUANET, destaca-se o fato de que a modelagem não ser complicada, pois o próprio modelo incorpora automaticamente uma série de funções que são comuns na simulação das bacias hidrográficas sem que o usuário precise se preocupar em programá-las. Entre as funções que o ACQUANET dispõe, as de maior importância são:

- Os usuários podem colocar quantos nós de demanda forem necessários para levar em conta as demandas na bacia (consuntivas ou não). O modelo atenderá a estas demandas de acordo com um valor de prioridade atribuída pelo usuário, que pode variar de 1 a 99 (o valor 1 é a maior prioridade);
- A operação do reservatório é feita utilizando o conceito de volume meta ou nível meta, ao qual se atribui uma prioridade. Desta forma sempre que o volume armazenado for menor que o volume meta, o reservatório guardará água desde que as outras prioridades da rede sejam menores.
- As perdas por evaporação dos reservatórios são levadas em conta por meio de processo iterativo.

De acordo com Barbosa (2008), o ACQUANET pode efetuar os cálculos de maneira sequencial no tempo, utilizando a opção de simulação contínua, ou estatisticamente, utilizando a opção de planejamento tático. Na simulação contínua, o valor mais importante é o número total de anos de simulação, denominado de NT. O usuário deve fornecer séries de vazões afluentes mensais com duração igual a NT e, a partir dos dados fornecidos, o modelo irá efetuar os cálculos continuamente, para todos os anos existentes. Ao final dos cálculos, os resultados serão fornecidos mensalmente para todos os anos. A simulação é dita contínua porque o modelo executa os cálculos da seguinte maneira:

- No primeiro ano, o modelo parte com os volumes iniciais dos reservatórios fornecidos e efetua os cálculos até o final deste ano;
- No segundo ano parte-se com volumes iniciais iguais aos volumes finais do ano anterior;

- O procedimento é repetido até o ano NT;
- Os resultados da simulação são fornecidos de forma contínua, do primeiro ao último ano.

Quando as séries de vazões são relativamente longas, os volumes iniciais dos reservatórios passam a ter pequena influência nos resultados. Assim, este tipo de simulação é recomendado para se obter uma ideia inicial do comportamento do sistema em estudo, das prioridades a serem adotadas. A simulação contínua é recomendada quando se quer ter ideia do comportamento do sistema ao longo do tempo.

No planejamento tático, além do número total de anos de simulação (NT), deve-se fornecer o número de anos do horizonte de simulação (NH). Usualmente adota-se um NH de dois anos. O horizonte de simulação é o número de anos durante os quais pretende-se estudar o comportamento do sistema em análise. Neste tipo de simulação, os cálculos são efetuados da seguinte maneira:

- Partindo, no primeiro ano, com os volumes iniciais dos reservatórios fornecidos, o modelo efetua os cálculos sequencialmente para NH anos da série de vazões;
- Na segunda rodada o procedimento acima é repetido e os cálculos são efetuados para NH anos, mas partindo do segundo ano da série de vazões;
- O procedimento acima é repetido até que seja efetuado o cálculo partindo-se do ano  $NT - NH + 1$  da série de vazões;
- Os resultados fornecidos são valores estatísticos para todos os meses do horizonte de simulação.

## **2.7 Histórico das crises hídricas enfrentadas pelo Açude Epitácio Pessoa ao longo de sua existência**

### **2.7.1 A crise hídrica de 1997-2000**

A construção do Açude Epitácio Pessoa, por parte do Governo Federal, fez parte de um conjunto de obras no Nordeste com o objetivo de minimizar os problemas causados pelas secas. Desde sua construção, o açude garantiu o suprimento da crescente demanda da região por ele abastecida, ininterruptamente, até a ocorrência da grande seca de 1997-2000, que perdurou até os primeiros meses de 2001.

O Açude foi palco de graves conflitos pelo uso da água, devido à crise no abastecimento de água de Campina Grande e outras cidades do compartimento da

Borborema, entre 1997-2000, como uma das consequências da severa seca que atingiu a região Nordeste do Brasil. Segundo Rêgo *et al.* (2000), além das condições climáticas, a causa primordial da crise foi a completa ausência de gerenciamento da bacia hidrográfica e, mais especificamente, as falhas no manejo do manancial, feito sem qualquer apoio em informações e/ou critérios técnicos seguros e atualizados.

Diante da ameaça de colapso total do abastecimento, representada pelo baixo nível a que ficou reduzido o volume d'água acumulado no reservatório, devido aos baixos volumes de chuvas e à falta de uma gestão eficaz do reservatório, foi necessária a implantação de um regime de racionamento da distribuição de água, que teve início no segundo semestre de 1998 e prolongou-se até os primeiros meses do ano 2000. Esse racionamento, associado a suspensão da descarga para perenização do rio Paraíba e da irrigação praticada na bacia hidráulica do reservatório, constituíram ao que se conhece por crise 1998-2000 no abastecimento d'água de Campina Grande (RÊGO *et al.*, 2001).

Muitos foram os acontecimentos que marcaram esse período da história do reservatório. Só a partir da detecção da situação de crise foi que os órgãos responsáveis pela sua gestão começaram a se mobilizar no sentido de tomar decisões que pudessem minimizar os impactos da crise para a população. A Tabela 1 apresenta um panorama desses acontecimentos no período mencionado.

Tabela 1 - Panorama dos acontecimentos na crise hídrica de 1997-2000

<b>Data</b>	<b>Acontecimento</b>
01/06/1998	Instauração do Inquérito Civil Público no Ministério Público.
25/06/1998	Constituição de comissão de peritos “Grupo Permanente de Assessoramento Técnico do 2º Centro de Apoio Operacional – 2º CAOP (Ministério Público/Curadoria do Meio Ambiente).
Agosto de 1998	Suspensão da descarga de perenização (DNOCS).
13/10/1998	Racionamento do abastecimento público, duas vezes por semana (Companhia de água e esgotos da paraíba - CAGEPA).
02/11/1998	Criação da Associação dos Irrigantes do Açude Epitácio Pessoa.
17/11/1998	Decreto da suspensão administrativa, a partir de 01/12/1998, da utilização das águas do açude Boqueirão para irrigação (IBAMA, DNOCS, SEMARH, Procuradoria de Justiça do Estado).

03/12/1998	Rompimento do acordo sobre a suspensão administrativa da irrigação em função de desentendimentos entre Secretaria Estadual da Infraestrutura e IBAMA.
25/02/1999	Concessão de liminar dos pedidos da “Ação Cautelar contra o DNOCS” de suspensão da irrigação a montante da bacia hidráulica do Açude Boqueirão (a partir de 03/03/1999) e de manutenção do fechamento da comporta de perenização do rio Paraíba.
03/03/1999	Suspensão judicial da irrigação (Ministério Público e Justiça Federal).
Setembro de 1999	Racionamento do abastecimento público intensificado para quatro dias por semana (CAGEPA).
25/01/2000	Proposta de suspensão do racionamento do abastecimento público (Governo do Estado/CAGEPA) Reação contrária da população.
26/04/2000	Suspensão do racionamento do abastecimento (Governo do Estado/CAGEPA).

Fonte: Oliveira & Ribeiro, 2004.

Estudos realizados sobre essa crise por Rêgo *et al.* (2000), apontam suas principais causas como sendo: a irrigação descontrolada na bacia hidráulica do reservatório (de maneira quantitativa e qualitativa), perdas excessivas no sistema de distribuição e níveis de consumo incompatíveis com a região semiárida; a construção descontrolada de reservatório a montante, reduzindo o volume afluente; a falta de monitoramento do reservatório e das condições hidrológicas da bacia, como vazão afluente, taxas de evaporação, sedimentos, fatores de qualidade e medidas de consumo, tanto para abastecimento urbano quanto irrigação; e o confuso cenário institucional nacional da gestão de recursos hídricos.

Apesar das discussões, que envolveram autoridades políticas, técnicas e o público em geral, nenhuma das propostas deu ênfase a ações de gestão da demanda como, por exemplo, a diminuição do desperdício no uso da água e medidas de conscientização da população para a redução do consumo. Todas as propostas dão ênfase a medidas de aumento da oferta em detrimento a medidas de diminuição do consumo, sem questionamentos sobre seus reais benefícios e custos socioeconômicos e ambientais. As medidas apontadas pelo governo como soluções definitivas seriam a construção de outra

barragem na mesma região, a jusante do reservatório e a transposição de águas de outras bacias hidrográficas.

Um novo período de estiagem nessa região foi vivenciado no ano de 2003, com o nível do reservatório em constante declínio e pequenos volumes de chuva. Tomando como exemplo os erros da crise anterior recém enfrentada, essa foi gerenciada de maneira relativamente diferente pela companhia de abastecimento. Após a implantação de regime de racionamento do abastecimento de água, a CAGEPA resolveu, em 2003, investir na educação dos consumidores, distribuindo panfletos e veiculando campanhas na mídia, como forma de conscientizar a população sobre os problemas causados pelo desperdício de água, além de estabelecer metas de consumo nas contas de água.

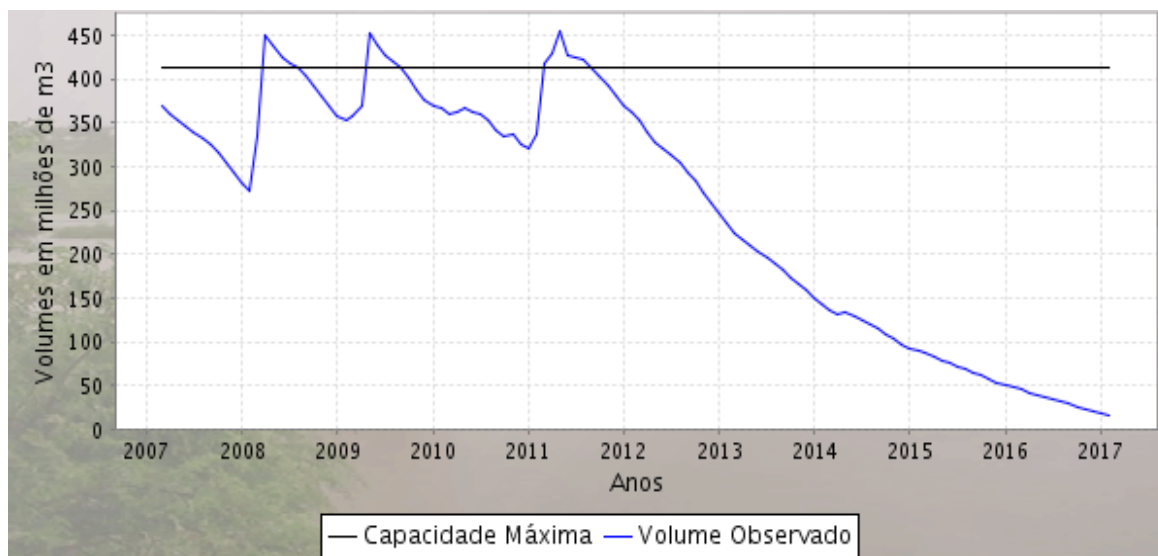
Ainda em 2003, metas de consumo foram estabelecidas como tentativa de aplicação de medidas de gestão da demanda, postergando assim a crise do abastecimento da cidade por manter o reservatório Eptácio Pessoa em níveis mais adequados, em comparação com o período de estiagem de 1997-2000. Mas, mesmo apesar da recente crise hídrica enfrentada, a ausência de uma gestão adequada teve continuidade, no início do ano de 2004, com os elevados índices pluviométricos que ocorreram e o consequente extravasamento do açude Eptácio Pessoa, a utilização das metas de consumo foi suspensa.

## 2.7.2 A crise hídrica 2012-2017

O período de seca no Açude Eptácio Pessoa tratado neste trabalho, iniciou-se em 2012, tendo em vista que o ano de 2011 foi de chuvas abundantes na região do alto curso da bacia do rio Paraíba. Isto possibilitou que o Açude Eptácio Pessoa (Boqueirão) atingisse, no final da quadra chuvosa, sua capacidade máxima de acumulação. Esta recarga vinha acontecendo em quase todos os anos do ciclo chuvoso iniciado em 2004, mas naquele ano de 2011, excepcionalmente, o açude extravasou até meados de setembro, isto é, até três meses após o período chuvoso normal na região. A partir de 2012 voltaram os anos de escassez pluvial e os níveis de acumulação no Açude Eptácio Pessoa, desde então, caíram continuamente, pois as retiradas mensais de água para abastecimento humano e para irrigação, somadas às perdas por evaporação, superavam sistematicamente os aportes hídricos, nulos ou insignificantes desde 2012 até abril de 2017, quando o reservatório recebeu o aporte de águas do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF).

A variação do volume de água armazenado no Açude Epitácio Pessoa nos últimos 10 anos, pode ser observado na Figura 3.

**Figura 3** - Variação do volume de água armazenado nos últimos 10 anos



Fonte: AESA, (2017).

Ao decorrer dos anos com chuvas regulares (2004 – 2011), onde os níveis do reservatório estavam sempre altos, não houve qualquer controle do uso da água do reservatório por parte dos gestores, fato que se repetiu mesmo após a configuração da crise 2012-2017 e perdurou até a tomada da primeira medida efetiva de gestão, em julho de 2014.

Em dezembro de 2012, o Ministério Público da Paraíba (MP-PB), decidiu instaurar um Inquérito Civil Público, com o objetivo de promover a coleta das informações necessárias para apurar a situação do Reservatório Epitácio Pessoa. O MP-PB decidiu, em reunião, organizar uma sessão especial para discutir os fatos relacionados a crise do Reservatório.

Em maio de 2012, a presidência da ANA se pronunciou pela primeira vez a respeito do problema informando as primeiras medidas que deveriam ser tomadas. Entre essas medidas estavam: a suspensão da perenização a jusante, que já havia sido suspensa desde a crise hídrica 1997-2000, e a proibição do uso das águas para a irrigação, medida que não foi colocada em prática.

Representantes do MP-PB, ANA, DNOCS e AESA se reuniram em junho de 2013 para discutir a decisão da ANA de suspender a irrigação às margens do Açude Boqueirão, decisão essa que foi alterada. A suspensão da irrigação passou a ter como data o mês de

fevereiro de 2014 e entre as medidas estabelecidas, decidiu-se pela limitação das áreas irrigadas em até cinco hectares. Nessa reunião, o presidente da ANA afirmou que com o volume do Reservatório haveria garantia de água até fevereiro de 2015, desde que, as pessoas utilizassem a água de forma racional, além de afirmar que seria feito o cadastramento dos irrigantes e as atividades de fiscalização seriam intensificadas, ao passo que os produtores que não cumprissem a determinação poderiam ser multados e ter seus equipamentos apreendidos por decisão judicial (RÊGO *et al.*, 2013).

O primeiro posicionamento da CAGEPA a respeito da crise enfrentada ocorreu apenas em dezembro de 2013, com o lançamento da campanha “Água não se joga fora”, cujo objetivo principal era o de alertar a população sobre a importância do uso racional da água e promover a participação da sociedade nas medidas de combate ao desperdício. A hipótese de racionamento de água em Campina Grande era descartada pela CAGEPA, pois, segundo o presidente da companhia, a água disponível na época seria suficiente para garantir o abastecimento de Campina e região até julho de 2014 e, apenas no caso de não haver recarga no Açude até julho do ano seguinte, a adoção de um sistema de racionamento, intercalando a distribuição de água a cada 24 horas, seria uma das alternativas da CAGEPA.

Após novas reuniões do MP-PB no início do ano de 2014, motivada pelo discurso de que ainda não seria o momento para suspender a irrigação, pois as medidas estabelecidas para redução do consumo de água estavam apresentando resultados satisfatórios, a ANA anunciou que a irrigação, antes prevista para ser suspensa em 01 de fevereiro de 2014, seria prorrogada até 28 de fevereiro de 2014. A ANA passou a estabelecer novas regras para o uso da irrigação e uma provável suspensão da mesma em caso de não haver aflúências nos meses seguintes. Assim, por diversas vezes, adiou a suspensão da atividade (SILVA *et al.*, 2014).

Devido ao baixo volume do reservatório e a não ocorrência de recarga nos meses onde historicamente havia recarga, a CAGEPA anunciou em maio de 2014 que adotaria um cronograma de racionamento para algumas cidades do Curimataú e Agreste do Estado, com rodízios no fornecimento em dias alternados, 24 horas com fornecimento e 24 horas sem o fornecimento.

Apenas na metade do terceiro ano seco, em 08 de julho de 2014, houve a primeira medida de gestão efetiva, que foi a suspensão da retirada de água para irrigação, até então, os irrigantes retiravam uma vazão de cerca de 0,9 m<sup>3</sup>/s. Nesse momento, o açude estava com apenas 98 milhões de metros cúbicos de água, 29,8% de sua capacidade (AESA,



2017).

Em 06 de dezembro de 2014, o reservatório apresentava 23,9% de sua capacidade de armazenamento, iniciou-se então o primeiro regime de racionamento de água em Campina Grande, até essa data, a CAGEPA estava autorizada a retirar uma vazão de 1500l/s de água, a partir de então, essa vazão passou a ser de 1.352l/s e a população passou a ficar sem água durante 36 horas por semana. Esse racionamento seguiu até 05 de junho de 2015, quando o nível chegou 76.121.000 m<sup>3</sup> de água, 18,9% de seu volume total.

O segundo regime de racionamento teve início em 06 de junho de 2015, a ANA diminuiu a autorização de retirada de água para uma vazão de 1084l/s. A população passou a ficar desabastecida 60 horas semanais.

Em 31 de outubro de 2015, quando o açude atingiu 14,2% do volume total, a ANA reduziu a vazão que poderia ser retirada pela CAGEPA, essa vazão passou a ser de 881 litros de água por segundo. A partir de então, a população passou a ficar sem água durante 84 horas semanais.

O quarto e último regime de racionamento foi adotado em 18 de julho de 2016, quando o açude atingiu o nível de 8,2% e houve o acionamento do sistema de captação de água por bombas flutuantes. A vazão de retirada passou a ser de 650 litros por segundo e o regime de racionamento em Campina Grande e região foi dividido em duas zonas. Os bairros e municípios da chamada zona 01, têm água das 5h da segunda-feira até a meia-noite da quarta-feira, ficando sem água por até 101h. Enquanto os bairros e municípios da zona 02, são abastecidos das 5h da quinta-feira até as 13h do sábado, ficando sem água por até 112h. Entre a tarde do sábado e a manhã da segunda-feira, nenhum local recebe água.

## **2.8 Técnicas para a redução de evaporação em reservatórios em regiões semiáridas**

Para Paiva e Paiva (2001), a evaporação é um dos fatores mais importantes no ciclo hidrológico da água, pois a medida que possibilita a mudança do estado físico da água, retroalimenta esse processo cíclico e proporciona a limpeza natural da mesma. Essa variável sofre influência de fatores tais como, temperatura, pressão atmosférica, pressão de vapor, umidade relativa, vento, natureza da superfície e radiação solar, fatores esses que podem influenciar de forma isolada ou em conjunto. A evaporação também desempenha um papel de fundamental importância na elaboração de cálculos de balanço hídrico, estimativas de operação de reservatórios de abastecimento e geração de energia elétrica.

Tendo em vista as altas taxas de evapotranspiração potencial na região semiárida do Nordeste do Brasil, que, de acordo com o INSA (2012), pode atingir a marca de 2.500 mm ano, gerando elevados déficits hídricos, pode-se afirmar que o fenômeno da evaporação, em regiões com características como essa, deve ser levado em consideração no dimensionamento e manejo de obras hídricas, bem como na tomada de decisão no que diz respeito a ações de planejamento e gerenciamento de reservatórios, tendo como objetivo o uso racional dos recursos hídricos disponíveis.

Nesse contexto, a utilização de técnicas que visam reduzir a evaporação em reservatórios de água é uma ferramenta importante na gestão dos recursos hídricos e já vêm sendo utilizadas em diferentes partes do mundo.

De acordo com Oliveira et al. (2017), as principais técnicas utilizadas com esse propósito são: quebra-ventos; corpos artificiais flutuantes à superfície, tais como: bolas plásticas e painéis de energia fotovoltaica flutuantes; plantas aquáticas de folhas flutuantes na superfície; e filmes monomoleculares de álcoois gordurosos.

Tais mecanismos diferem entre si na forma como interferem na dinâmica da evaporação. Os quebra-ventos, definidos como a utilização de barreiras físicas no entorno do corpo hídrico, tais como árvores de grande porte, reduzem a velocidade do vento na área e, dessa forma, minimizam a ação do mesmo no processo evaporativo. Como vantagens dessa técnica, destacam-se a boa eficiência na redução da evaporação e baixa manutenção, como desvantagens, aparecem o alto custo de implantação e a difícil escolha das espécies vegetais que melhor se adaptam às condições locais; os corpos artificiais flutuantes à superfície atuam reduzindo a incidência do vento e dos raios solares na superfície do reservatório, diminuindo assim as perdas evaporativas causadas por esses dois fatores. A vantagem dessa técnica é a alta eficiência e a desvantagem é que sua utilização requer um alto custo na aquisição e manutenção dos corpos artificiais que flutuam na superfície do lago; as plantas aquáticas de folhas flutuantes na superfície também atuam reduzindo a incidência do vento e dos raios solares na superfície do reservatório, é uma técnica com baixos custos de utilização, porém apresentam baixa eficiência e podem alterar as características da água do reservatório; por último, os filmes monomoleculares de álcoois gordurosos provocam o aumento da tensão superficial, reduzindo as trocas de energia entre a superfície da água e a atmosfera e, consequentemente, a evaporação. Uma eficiência razoável se apresenta como vantagem,

e a desvantagem é a necessidade de reaplicação das substâncias químicas, na maioria dos casos, o álcool cetílico, responsáveis pelo desempenho dessa técnica.

Ainda segundo Oliveira et al. (2017), os corpos artificiais flutuantes à superfície, bolas plásticas ou painéis de energia fotovoltaica, seriam as técnicas com maior eficiência para o caso da região em estudo, com percentual de eficiência de até 95% e, com relação as placas fotovoltaicas, estas ainda apresentam dupla vantagem, pois ao mesmo tempo em que os painéis solares reduzem a evaporação da água, essas estruturas convertem a energia fotovoltaica em energia elétrica, gerando energia de fonte renovável e não poluente, sendo assim, estas seriam as técnicas para a redução de evaporação em reservatórios mais indicadas para o caso de estudo deste trabalho.

### **3. METODOLOGIA**

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, o caso de estudo, a definição dos cenários a serem simulados no modelo matemático AcquaNet, para o caso do reservatório Eptácio Pessoa, além de serem apresentados os dados de entrada utilizados nas simulações.

A base metodológica utilizada para o desenvolvimento dessa pesquisa será realizada nas seguintes etapas:

- Caracterização da área de estudo e pesquisa bibliográfica para verificar quais foram as ações efetivamente tomadas pelos órgãos competentes frente a crise hídrica 2012-2017;
- Aquisição de dados físicos, hidrológicos e meteorológicos referentes ao sistema para fins de alimentação do modelo matemático AcquaNet;
- Consulta a especialistas das diversas áreas dos recursos hídricos, relacionadas a temática discutida nesse trabalho, para que os mesmos sugiram medidas de gestão que, na opinião deles, deveriam ter sido tomadas frente à crise hídrica em estudo;
- Definição dos cenários que serão simulados no AcquaNet, com base na opinião dos especialistas consultados e na utilização de técnicas de redução de taxas evaporativas em reservatórios;
- Simulação desses cenários no AcquaNet;
- Análise dos resultados obtidos e utilização de índices de sustentabilidade em reservatórios, para realizar comparações entre os cenários simulados e assim determinar como cada conjunto de ações teria impactado a questão da crise hídrica em Campina Grande e região circunvizinha.

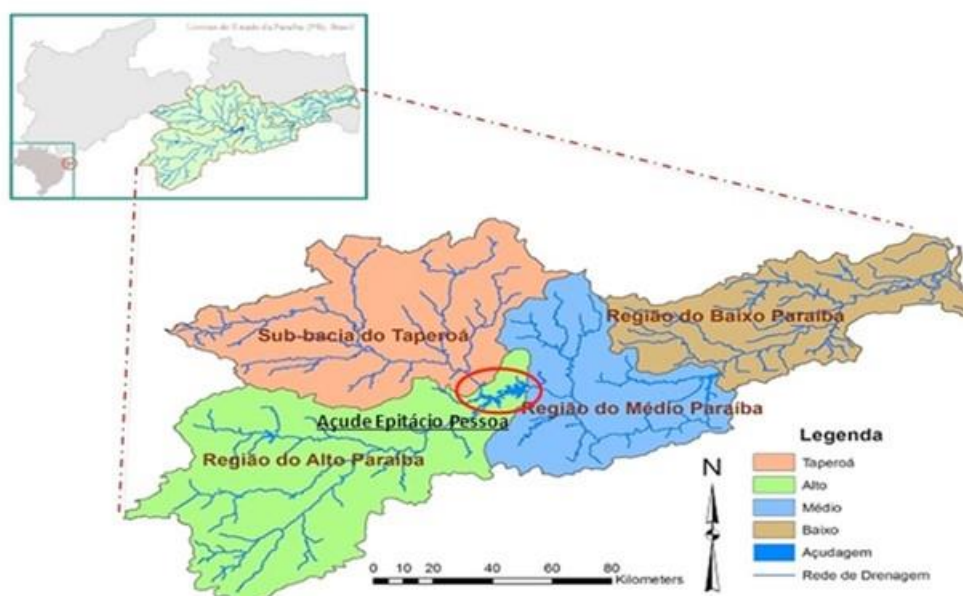
#### **3.1 Caso de Estudo**

O reservatório Eptácio Pessoa está situado na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba, um dos sistemas hidrográficos mais importantes do semiárido nordestino. É a segunda maior bacia do Estado, compreendendo 35,7% do território estadual e drenando uma área de 20.127,17 km<sup>2</sup>, composta por 85 (oitenta e cinco) municípios e abriga as duas mais importantes cidades do Estado (VIEIRA, 2008).

Totalmente inserida no Estado da Paraíba, a bacia possui diversidade de clima e características físicas, além de uma grande extensão geográfica, sendo dividida em quatro sub-regiões, são elas: as regiões hidrográficas do Alto, Médio e Baixo Curso do rio Paraíba e a sub-bacia do rio Taperoá.

A Região do Alto Curso, onde está situado o reservatório Eptácio Pessoa, está localizada na parte sudoeste do planalto da Borborema, faz fronteira ao norte com a bacia do Taperoá, ao sul e a oeste com o Estado de Pernambuco e a leste com a Região do Médio Curso do rio Paraíba, como pode ser observado na Figura 4. A Região do Médio Curso situa-se ao sul do planalto da Borborema, limita-se ao sul, com o Estado de Pernambuco, a oeste, com a bacia do Taperoá e com a Região do Alto Curso. A Região do Baixo Curso do rio Paraíba está localizada na parte litorânea do Estado da Paraíba. Limita-se ao sul com a sub-bacia do Gramame e com o Estado de Pernambuco, ao norte com a bacia do Mamanguape e Miriri, a oeste com a Região do Médio Curso do rio Paraíba e a leste com o Oceano Atlântico. A sub-bacia do rio Taperoá está localizada na parte central do estado da Paraíba. Limita-se com as sub-bacias do Espinharas e do Seridó a oeste, com a Região do Alto Curso do rio Paraíba ao sul, com as bacias do Jacú e Curimataú ao norte, e com a Região do Médio Curso do rio Paraíba a leste (RIBEIRO, 2012).

**Figura 4** - Localização do reservatório na bacia do rio Paraíba



Fonte: Rêgo *et al.* (2013).

A Região do Alto Curso do rio Paraíba é uma das regiões de menor índice pluviométrico do Brasil, com precipitação média na região do açude de 600 mm/ano,

sendo que os totais anuais se concentram em um período de quatro meses que, geralmente, corresponde aos meses de fevereiro, março, abril e maio. Observa-se que a maior concentração do total precipitado ocorre em um período aproximado de dois a quatro meses, o que corresponde a 65% do total das chuvas anuais.

A Tabela 2 apresenta as características gerais da região do alto curso da bacia hidrográfica do rio Paraíba, indicando suas condições climáticas e hidrológicas.

**Tabela 2-**Características Hidroclimatológicas da Região do Alto Curso da BH do rio Paraíba

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	6.727,69
Precipitação (mm/ano)	600
Período de concentração da Precipitação (meses)	4 (fev-mai)
Evaporação (mm/ano)	2.000-2.500
Clima (classificação Köppen)	Semiárido/Quente (BSwh')
Temperatura Mínima (°C)	18-22
Temperatura Máxima (°C)	28-31

Fonte: Vieira (2008).

O Açude Epitácio Pessoa, popularmente conhecido por Boqueirão, é o segundo maior reservatório de água superficial do estado da Paraíba, abastece uma população de cerca de 700 mil de habitantes, maior parte composta por habitantes da cidade de Campina Grande, maior cidade do interior do estado e núcleo educacional, econômico e industrial, fato que gera uma grande preocupação com a gestão dos recursos hídricos por ele disponibilizados, não só nos períodos de crise anteriores mencionados como na crise hídrica 2012-2017 (RÊGO *et al.* 2014).

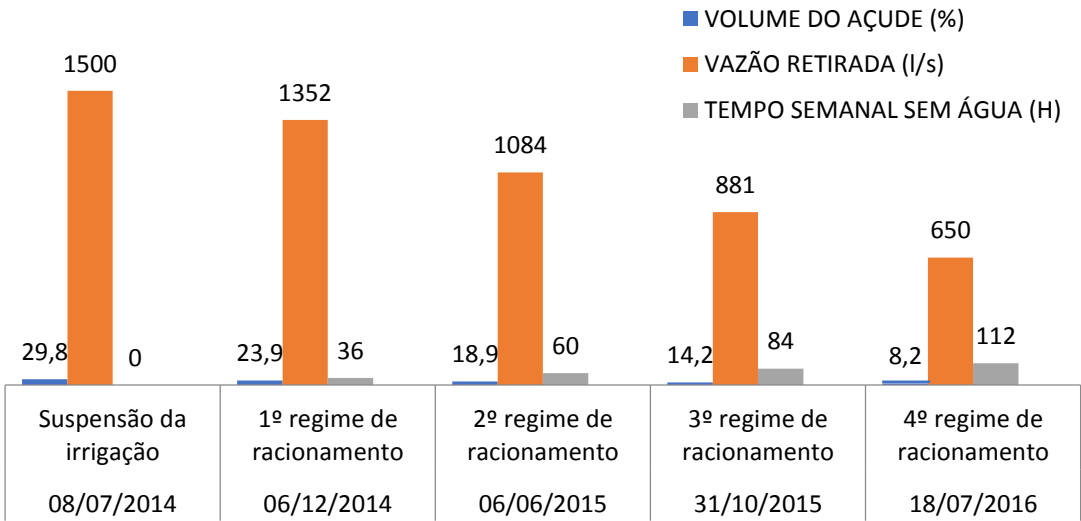
Boqueirão foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS entre os anos de 1953 e 1956 (DNOCS, 2015), e seu principal objetivo era solucionar os problemas de abastecimento de água da cidade de Campina Grande, sendo também previstos os usos da água do reservatório para perenização do médio curso do rio Paraíba, piscicultura, irrigação, lazer e até para aproveitamento hidrelétrico. O reservatório foi projetado para uma capacidade máxima de armazenamento de 536

milhões de metros cúbicos de água. Contudo, em um levantamento batimétrico realizado no ano de 2004 foi atestado que sua capacidade máxima de acumulação foi reduzida para 411.686.287 de metros cúbicos de água devido ao assoreamento ocorrido. Em 2013 foi realizado pela Agência Nacional de Águas - ANA um novo levantamento batimétrico, que confirmou o de 2004.

### 3.2 Medidas de gestão implantadas pelos órgãos gestores frente à atual crise hídrica no açude Epitácio Pessoa

Na Figura 5, são mostradas todas as medidas que foram efetivamente tomadas no que diz respeito ao racionamento de água no açude Epitácio Pessoa, com as respectivas datas de quando essas ações foram tomadas, qual foi a redução real na retirada de água do açude e como a população foi impactada com essas medidas.

**Figura 5 - Medidas tomadas frente a atual crise hídrica**



Fonte: Autora.

A primeira medida tomada foi a suspensão da irrigação, a partir de 8 de julho de 2014. Antes dessa medida, cerca de 60 mil m³ de água eram consumidos com a irrigação diariamente. Após esse marco, a água passou a ser retirada apenas para consumo humano, com uma retirada de 1,5 m³/s.

O primeiro regime de racionamento iniciou-se em 6 de dezembro de 2014, a população ficava sem água durante 36 horas por semana e a vazão retirada passou a ser de 1,352 m³/s.

O segundo regime de racionamento começou em 6 de junho de 2015, a ANA diminuiu a autorização de retirada de água para uma média mensal de 1.084 litros por segundo. A população passou a ficar 60 horas por semana sem água.

Em 31 de outubro de 2015, iniciou-se um novo regime de racionamento. A partir de então, a população passou a ficar sem água durante 84 horas por semana e a vazão retirada pela CAGEPA era de 0,881 m<sup>3</sup>/s.

O quarto e último regime de racionamento foi adotado em 18 de julho de 2016, onde houve o início da captação de água por meio de bombas flutuantes, tendo em vista que o reservatório atingiu um nível onde não era possível a captação por gravidade. A vazão retirada passou a ser de apenas 650 l/s e, por questões técnicas, nesse regime de racionamento, a cidade foi dividida em duas zonas. Os bairros da chamada zona 1, recebiam água das 5h da segunda-feira até a meia-noite da quarta-feira, ficando sem água por até 101h. Enquanto os bairros da zona 2, eram abastecidos das 5h da quinta-feira até as 13h do sábado, ficando sem água por até 112h. Entre a tarde do sábado e a manhã da segunda-feira, nenhum local recebia água.

### **3.3 Resultados da consulta à especialistas para a definição dos cenários a serem simulados**

Para a definição dos cenários a serem simulados, além de pesquisa sobre metodologias de racionamento e sobre a utilização de técnicas de redução das perdas evaporativas, foram também ouvidos seis especialistas das mais diversas áreas do conhecimento relacionados aos recursos hídricos (Docentes de Recursos Hídricos, Docentes de Saneamento Ambiental, CAGEPA, Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba e AESA), de modo que os cenários fossem representativos das diferentes áreas de conhecimento relacionadas ao problema. As sugestões propostas por esses especialistas estão apresentadas na transcrição de suas falas a seguir.

- **Especialista 1**

*“No que se refere ao problema em foco, entendemos que as medidas de gestão, estruturais, de controle de perdas, conscientização da população, entre outras, deveriam ter sido tomadas desde sempre. O reservatório Epitácio Pessoa teve seus níveis de armazenamento decrescidos no período 1998-2000 resultando na primeira crise de água para a cidade de Campina Grande e cidades circunvizinhas. O período 2004-2011 foram de anos*



*hidrologicamente úmidos e normais no que se refere às precipitações na região e vazões afluentes ao reservatório. Assim, se medidas de gestão de recursos hídricos (gestão da oferta e gestão da demanda de água) tivessem sido adequadamente implementadas durante esse período, teria sido possível evitar (ou, pelo menos, minimizar) a segunda crise de água, incluindo os racionamentos de água para a população. Isso exigiria, minimamente, a implementação da fiscalização da outorga e, idealmente, de todos os instrumentos de gestão de recursos hídricos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos, assim como o pleno funcionamento do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH (do qual fazem parte as entidades responsáveis pela gestão hídrica do Reservatório Epitácio Pessoa). Nesse processo estão envolvidos os usuários da água do Reservatório (abastecimento urbano – humano e indústrias – e irrigantes).*

*Verifica-se, portanto, a ausência de ações para a implementação plena dos instrumentos de gestão durante o período de anos ditos “normais” do ponto de vista hidrológico como, também, ausência de ações relacionadas à gestão de demanda de água (seja no meio rural ou urbano). Essas ações, sequer, foram iniciadas no ano de 2012 quando se identificou o primeiro ano do novo período de estiagem, momento em que foi possível constatar o início do decaimento dos níveis de armazenamento do Reservatório. Assim, destacam-se nesse processo de análise do problema em foco: desobediência à vazão de regularização do Reservatório Epitácio Pessoa; usuários com outorga, mas sem condicionamento dessa outorga à eficiência no uso da água (abastecimento urbano); usuários sem outorga fazendo uso da água (irrigantes); usuários com termo de outorga vencido por um determinado período (abastecimento urbano); importantes medidas de gestão da demanda nunca colocadas em prática (reuso de água, captação de água de chuva, dentre outras).*

*A falta de ações de gestão no que se refere ao uso da água do Reservatório, no período normal de afluições hídricas, construiu a crise hídrica vivenciada pela região no período de estiagem. As medidas que deveriam ter sido tomadas, portanto, estão relacionadas com os aspectos listados acima. As medidas tomadas a partir de 2014 (mostradas no item 3.2) foram todas tardias.”*

- **Especialista 2**

*“Analisando a pequena série histórica volumétrica do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), 1992- 2017, podemos observar que passamos por um período atípico entre o*

*período de 2004 – 2011, quando o reservatório apresentou um volume acima de 300 milhões de m<sup>3</sup>. De fato, podemos observar históricos que o reservatório passa por períodos mais curtos de enchimento e esvaziamento.*

*No momento não há medidas ou ações empreendidas para um efetivo manejo do açude, a gestão do reservatório se restringe a decisões extremas tomadas no período de seca, como racionamento, e estas se cessam nos períodos chuvosos.*

*Com base no observado podemos propor como medidas de gestão a implementação plena dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos, uma vez que o plano da bacia apresenta ações adequadas com as necessidades para o gerenciamento. No entanto a cobrança não foi implantada, apesar de já existir a resolução do conselho estadual, que geraria a dotação orçamentária que auxiliaria no gerenciamento da bacia hidrográfica e suas estruturas, outro aspecto que deve melhorar são os mecanismos de acompanhamento das outorgas, principalmente na observância de suas vigentes, condicionantes e relatórios de acompanhamento, deve também dispor de um sistema de informação que forneça subsídios para plena implementação dos instrumentos, que possibilite uma análise dos dados armazenados e diretrizes para tomadas de decisão. De fato, para o cenário de escassez hídrica que estamos passando um dos principais instrumentos que precisa, com urgência, ser desenvolvido e implementado é uma proposta de enquadramento do reservatório, uma vez que o mesmo ainda não é enquadrado, pois é um instrumento que visa preservar, controlar/gerenciar a qualidade e quantidade da água do reservatório. Neste instrumento são planejadas metas com critérios definidos para a retirada de águas do reservatório, como também é possível avaliar a influência do grande número de barramentos construídos a montante do açude Epitácio Pessoa-Boqueirão.*

*Recomendo com base no perfil histórico de volume do reservatório, que em junho de 2012, uma vez que já era sabido que este ano inauguraria um novo ciclo de baixas pluviosidade, deveria já ter sido iniciado de forma programada a redução da vazão de saída, tanto para irrigação como para abastecimento das cidades por ele abastecido, uma vez que a partir de maio deste ano foi observado apenas decréscimo no volume armazenado.*

*Mudanças estruturais poderiam ter sido implementadas neste momento tais como manutenção na torre de medição, nos vertedoras e taludes do reservatório, como também a retirada do excesso de sedimento do leito do reservatório, instalação de macro medidores de*

vazão por parte da CAGEPA, na intenção de obter medidas mais precisas das vazões de retirada.

*Medidas controle para redução das perdas de água na rede de distribuição também auxiliaria no quadro atual, tais como, reabilitação ou substituição das canalizações da rede de distribuição nos setores onde os vazamentos são mais recorrentes, outro aspecto seria buscar reduzir o número da perda física por furto.*

*Quanto à conscientização da população do uso racional da água tem um papel importante nas mudanças comportamentais para combate ao desperdício. Esta conscientização poderá ser implementada de forma sistemática através de Programas que tenham como objetivo principal o despertar na população da importância da água na sua vida e que o seu uso sustentável é uma forma racional de evitar a sua falta no futuro. O programa deve promover um trabalho de educação para conscientizar toda a comunidade escolar quanto ao uso sustentável da água. Deve fazer uso dos canais de divulgação da mídia, da internet, das redes sociais para um maior alcance das ações do programa. Também devem ser mobilizadas as associações de moradores, de comerciantes, de industriais e dos diversos seguimentos da sociedade civil, entre outras ações.”*

- **Especialista 3**

*“Primeiramente, mesmo desconsiderando as retiradas para irrigação, a própria vazão outorgada pela ANA à CAGEPA já era maior que a vazão de regularização do açude, sendo assim, a primeira medida que deveria ter sido tomada seria o atendimento as especificações de capacidade do próprio açude, pela ANA, na liberação de outorga e controle no cumprimento de retiradas outorgadas.*

*Num segundo quadro, deveriam ser avaliadas as retiradas para irrigação de cultivos, limitando-se a vazão de outorga para cada irrigante, até que fosse atingido um limite de capacidade do açude (talvez algo em torno de uso para irrigação até atingir os 60% da capacidade do reservatório). Entendo que é difícil impedir 100% do uso da irrigação, comprometendo toda uma produção local e afetando fortemente a atividade econômica de várias famílias da cidade de Boqueirão. Sendo assim, neste cenário de seca atual, diante das previsões que tínhamos e diante de todo o histórico climático da região, não há dúvidas de que a irrigação deveria ter sido interrompida muito antes do que ocorreu.*

*Com relação ao controle de perdas, por parte da CAGEPA, se após o racionamento a empresa conseguiu reduzir suas perdas, isto poderia ter sido feito antes da situação crítica estar instalada. Isto reflete que não só a população em geral, como a própria empresa não reconhece o real valor da água, como bem de consumo indispensável à vida. Ainda considero as perdas atuais elevadas, ao se considerar a situação em que chegamos.*

*Outras medidas que também poderiam ter sido tomadas seriam: o racionamento antecipado; medidas de incentivo ao aproveitamento de águas de chuvas em edificações públicas e residenciais; medidas educativas de uso da água e associação de diferentes formas de racionamento, como a interrupção da oferta associada a cobrança de multas, caso o usuário não apresentasse redução significativa de consumo.*

*E, por fim, a redução de consumo se deu em áreas específicas, de forma a não comprometer fortemente a arrecadação da CAGEPA. O racionamento não foi socialmente justo. Deveriam ter sido criadas campanhas, planejadas de forma antecipada para armazenamento de água e distribuição de água mineral para as regiões mais afetadas pelo racionamento, quando se tratava de famílias de baixa renda.”*

- **Especialista 4**

*“Todas as medidas tomadas aconteceram de forma tardia, o que ocasionou em maiores danos para população, parte mais afetada com o racionamento severo. As medidas de gestão deveriam ter sido pensadas e implementadas assim que se constatou o quadro de ano seco em 2012. As principais medidas a serem tomadas seriam:*

- ✓ *A partir do início de 2012, a vazão máxima que poderia ser retirada seria a dita vazão de regularização, estabelecida pelo PERH, de 1,23 m³/s;*
- ✓ *Suspensão total da irrigação em julho de 2012;*
- ✓ *Medidas de racionalização, ou seja, incentivar a população a diminuir o seu consumo sem a necessidade de racionamento, por exemplo, com uso de equipamentos poupadores.”*

- **Especialista 5**

*“Realizando-se um comparativo da crise atual com a crise enfrentada entre 1998 e 2001, mesmo dispondo de menos recursos sem a participação da ANA, a crise anterior*

*foi muito melhor gerida. Acredito que algumas medidas que poderiam ter sido tomadas para amenizar o quadro de racionamento que estamos enfrentando seriam:*

- ✓ *O uso insignificante da água deveria existir apenas para fins de cobrança, mas todo e qualquer uso das águas do reservatório só deveria ser permitido por meio de outorga, dessa forma, seria possível saber com mais clareza quanto está sendo consumido e quem são os consumidores;*
- ✓ *Criação de uma área de preservação no entorno do reservatório de 30m a partir de cada uma das margens, e essa área não poderia ser utilizada para fins de irrigação;*
- ✓ *Permissão de irrigação apenas por gotejamento e com vazão máxima para este fim de 0,28 m<sup>3</sup>/s (para respeitar a vazão de regularização com 1m<sup>3</sup>/s para abastecimento humano);*
- ✓ *Controle da retirada de água para irrigação por meio da implantação de hidrômetro nas bombas utilizadas pelos irrigantes;*
- ✓ *Antecipar os regimes de racionamento e aumentar a quantidade de horas sem água no início do racionamento;*
- ✓ *Permitir que a soma das retiradas no reservatório fosse de, no máximo, a vazão de regularização estabelecida pelo PERH (1,23m<sup>3</sup>/s) ou a estabelecida pela ANA (1,85 m<sup>3</sup>/s).”*

- **Especialista 6**

*“A crise hídrica de Campina Grande começou a ter sinais de alerta desde o ano de 2012. Neste ano foram realizados diversos alertas sobre os baixos níveis do reservatório Epitácio Pessoa. No entanto, poucas ações foram realizadas e as retiradas continuaram sendo realizadas, sem que fossem realizadas medidas preventivas para evitar o colapso.*

*Sugere-se que, se tivessem sido realizadas medidas emergenciais no ano de 2012 – quando os níveis do reservatório começaram a dar sinais de alerta, o reservatório poderia ter atendido à população por um período de tempo maior. Além disso, o uso de água para irrigação foi suspenso de forma tardia, o que levou o reservatório a diminuir os níveis de reserva de forma ainda mais rápida.*

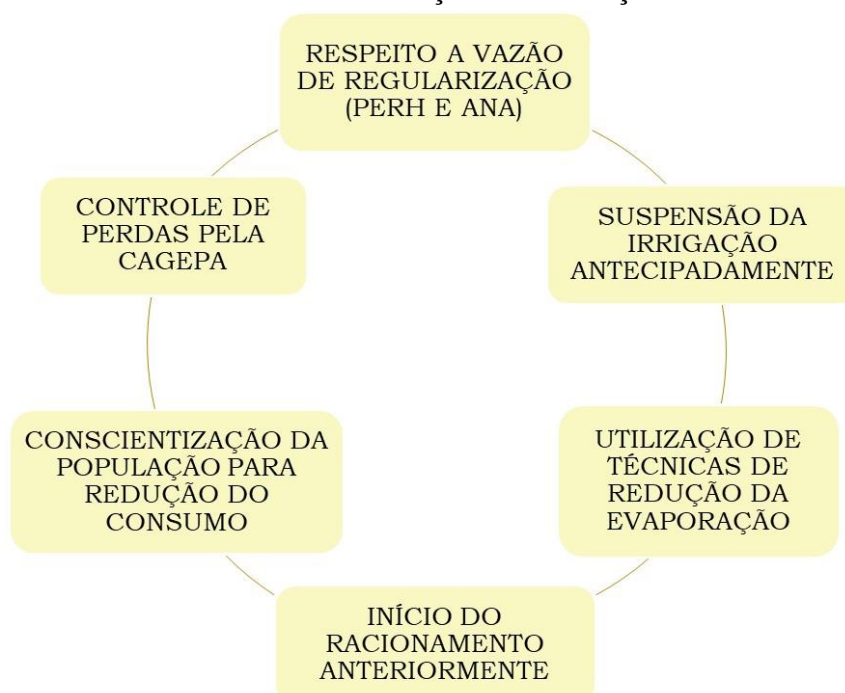
*Poucas ações foram realizadas pelos órgãos responsáveis pela gestão do reservatório, no sentido de promover o uso racional da água, técnicas de irrigação mais apropriadas para reduzir o consumo e campanhas de conscientização à população.*

*Vale ressaltar que, com a chegada das águas da transposição, o reservatório conseguiu melhorar os níveis de reserva. Contudo, o racionamento não deveria ainda ser suspenso, seria necessário um período mais longo para garantir a segurança hídrica do reservatório.”*

### 3.4 Definição dos cenários a serem simulados

Após a análise dos resultados obtidos com a consulta aos especialistas e com o estudo sobre metodologias de racionamento, aplicando as medidas de gestão de modo que o deplecionamento do reservatório fosse constante ao longo das simulações, e também sobre técnicas de redução das perdas evaporativas, percebe-se que os pontos mais importantes que deveriam ter sido observados no que diz respeito as medidas de gestão que deveriam ter sido tomadas frente à atual crise hídrica e consequente racionamento no reservatório Eptácio Pessoa, seriam: respeito as vazões de regularização estabelecidas pela ANA e pelo PERH-PB; suspensão da irrigação anteriormente; fiscalização e controle da irrigação quando esta estivesse sendo permitida; início do racionamento para a população anteriormente; implantação de medidas de conscientização da população que visassem a redução do consumo (consumo consciente); controle de perdas por parte da CAGEPA e a utilização de técnicas de redução das perdas evaporativas no reservatório, como pode ser visto na Figura 6.

**Figura 6** – Medidas levadas em consideração na elaboração dos cenários simulados



Fonte: Autora.

Dessa forma, oito cenários que englobam essas medidas de gestão mais importantes foram definidos e as respectivas vazões que deveriam ser retiradas do reservatório ao longo dos anos, respeitando essas medidas, foram calculadas e utilizadas como os dados de entrada para a realização das simulações. A definição dos cenários pode ser vista nos itens 3.4.1 a 3.4.9.

### 3.4.1 Cenário Padrão

O primeiro cenário simulado foi o cenário padrão, definido como o cenário onde as condições simuladas e os dados de entrada são exatamente iguais àquelas que realmente aconteceram, ou seja, um cenário no qual os valores das vazões retiradas do reservatório ao longo dos anos são iguais aos valores que se tem registrado para o período. A simulação desse cenário teve como objetivo a calibração do modelo, procurando observar se, para valores de dados de entrada iguais aos que aconteceram na realidade, o modelo apresenta como resultados finais valores compatíveis com os que são observadas na série de dados histórica para o reservatório no mesmo período.

Isto posto, os valores de vazões retiradas ao longo dos anos, tanto para abastecimento humano, quanto para irrigação, utilizados na simulação desse cenário, de acordo com dados da CAGEPA (2012) e Rêgo *et al.*, (2012), podem ser observados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário padrão

Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)
jan/12	2,450	jan/14	1,975	jan/16	0,881
fev/12	2,450	fev/14	1,975	fev/16	0,881
mar/12	2,450	mar/14	1,975	mar/16	0,881
abr/12	2,450	abr/14	1,975	abr/16	0,881
mai/12	2,450	mai/14	1,975	mai/16	0,881
jun/12	2,450	jun/14	1,975	jun/16	0,881
jul/12	2,450	jul/14	1,500	jul/16	0,650
ago/12	2,450	ago/14	1,500	ago/16	0,650
set/12	2,450	set/14	1,500	set/16	0,650
out/12	2,450	out/14	1,500	out/16	0,650
nov/12	2,450	nov/14	1,500	nov/16	0,650
dez/12	2,450	dez/14	1,352	dez/16	0,650
jan/13	2,450	jan/15	1,352	jan/17	0,650

fev/13	2,450	fev/15	1,352	fev/17	0,65
mar/13	2,450	mar/15	1,352	mar/17	0,65
abr/13	2,450	abr/15	1,352	abr/17	0,65
mai/13	2,450	mai/15	1,352	mai/17	0,65
jun/13	2,450	jun/15	1,084	jun/17	0,65
jul/13	1,975	jul/15	1,084	jul/17	0,65
ago/13	1,975	ago/15	1,084	ago/17	0,65
set/13	1,975	set/15	1,084	set/17	0,65
out/13	1,975	out/15	1,084	out/17	0,65
nov/13	1,975	nov/15	0,881	nov/17	0,65
dez/13	1,975	dez/15	0,881	dez/17	0,65

### 3.4.2 Cenário 1

As medidas de gestão tomadas na simulação desse cenário foram as que seguem:

Desde o início da simulação, em janeiro de 2012, a vazão retirada máxima foi de 1,85 m<sup>3</sup>/s, respeitando a vazão de regularização estabelecida pela ANA, dessa forma ficou estabelecido 1,5 m<sup>3</sup>/s para abastecimento humano e 0,35 m<sup>3</sup>/s para irrigação.

Suspensão da irrigação quando o reservatório atingiu a marca de 60% do volume total.

Início do racionamento para a população quando o reservatório atingiu 50% do seu volume total, reduzindo a retirada para 60% do que era retirado inicialmente para abastecimento humano.

Quando o reservatório atingir 30% do seu do volume total de armazenamento, reduzir a retirada para 50% do que era retirado inicialmente para abastecimento humano.

Quando o reservatório atingiu 20% do seu do volume total de armazenamento, reduziu-se a retirada para abastecimento humano para 40% do que era retirado inicialmente.

Quando o reservatório atingiu 10% do seu do volume total de armazenamento, reduziu-se a retirada para 30% do que era retirado inicialmente para abastecimento humano.

Dessa forma, foram definidas as respectivas vazões que deveriam ser retiradas do reservatório e partir de qual momento essas medidas deveriam ser tomadas, da seguinte maneira: iniciou-se a simulação com o dado da vazão retirada inicialmente, após feita a modelagem e com os resultados finais disponibilizados pelo modelo, observou-se qual o momento que o reservatório atingiu a porcentagem de seu volume total onde a próxima medida de gestão deve ser aplicada, a partir desse ponto, mudou-se o valor da vazão



retirada, de modo que fique compatível com a medida de gestão proposta, e realizou-se nova simulação. Esse processo se repete até que todas as medidas de gestão propostas sejam levadas em consideração na simulação. Esse mesmo procedimento foi adotado na simulação de todos os cenários propostos.

Dessa forma, os valores de vazões retiradas ao longo dos anos utilizados na simulação do cenário 1, podem ser observados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 1**

Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)
jan/12	1,850	jan/14	1,110	jan/16	0,740
fev/12	1,850	fev/14	1,110	fev/16	0,740
mar/12	1,850	mar/14	1,110	mar/16	0,740
abr/12	1,850	abr/14	1,110	abr/16	0,740
mai/12	1,850	mai/14	1,110	mai/16	0,740
jun/12	1,850	jun/14	1,110	jun/16	0,740
jul/12	1,850	jul/14	1,110	jul/16	0,740
ago/12	1,850	ago/14	1,110	ago/16	0,740
set/12	1,850	set/14	1,110	set/16	0,740
out/12	1,850	out/14	1,110	out/16	0,740
nov/12	1,850	nov/14	1,110	nov/16	0,550
dez/12	1,850	dez/14	1,110	dez/16	0,550
jan/13	1,850	jan/15	0,925	jan/17	0,550
fev/13	1,500	fev/15	0,925	fev/17	0,550
mar/13	1,500	mar/15	0,925	mar/17	0,550
abr/13	1,500	abr/15	0,925	abr/17	0,550
mai/13	1,500	mai/15	0,925	mai/17	0,550
jun/13	1,500	jun/15	0,925	jun/17	0,550
jul/13	1,500	jul/15	0,925	jul/17	0,550
ago/13	1,110	ago/15	0,925	ago/17	0,550
set/13	1,110	set/15	0,925	set/17	0,550
out/13	1,110	out/15	0,925	out/17	0,550
nov/13	1,110	nov/15	0,925	nov/17	0,550
dez/13	1,110	dez/15	0,740	dez/17	0,550

### 3.4.3 Cenário 2

As medidas de gestão tomadas na simulação desse cenário foram as seguintes:

A vazão inicial retirada máxima seria a vazão de regularização estabelecida pelo PERH-PB, de 1,23 m³/s, dessa forma, ficou estabelecido 1,0 m³/s para abastecimento humano e 0,23 m³/s para irrigação.

Quando o açude atingiu a marca de 70% do seu do volume total de armazenamento, houve diminuição da vazão retirada para irrigação em 50% do que era retirado inicialmente.

A suspensão total da irrigação aconteceu quando o reservatório atingiu a marca de 50% do seu do volume total de armazenamento.

O início do racionamento para consumo humano se deu quando o volume do reservatório chegou a 40% do seu do volume total de armazenamento, com diminuição da vazão retirada para abastecimento humano para 60% do que era retirado inicialmente;

Quando o reservatório atingiu volume de 30% do seu volume total, diminuiu-se a retirada para abastecimento humano para 50% do que era retirado inicialmente.

Dessa forma, os valores de vazões retiradas ao longo dos anos utilizados na simulação do cenário 2, podem ser observados na Tabela 5.

**Tabela 5** - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 2

Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)
jan/12	1,230	jan/14	1,000	jan/16	0,615
fev/12	1,230	fev/14	1,000	fev/16	0,615
mar/12	1,230	mar/14	1,000	mar/16	0,615
abr/12	1,230	abr/14	1,000	abr/16	0,615
mai/12	1,230	mai/14	1,000	mai/16	0,615
jun/12	1,230	jun/14	1,000	jun/16	0,615
jul/12	1,230	jul/14	1,000	jul/16	0,492
ago/12	1,230	ago/14	1,000	ago/16	0,492
set/12	1,230	set/14	1,000	set/16	0,492
out/12	1,230	out/14	0,738	out/16	0,492
nov/12	1,115	nov/14	0,738	nov/16	0,492
dez/12	1,115	dez/14	0,738	dez/16	0,492
jan/13	1,115	jan/15	0,738	jan/17	0,492
fev/13	1,115	fev/15	0,738	fev/17	0,492
mar/13	1,115	mar/15	0,738	mar/17	0,492
abr/13	1,115	abr/15	0,738	abr/17	0,492
mai/13	1,115	mai/15	0,738	mai/17	0,492
jun/13	1,115	jun/15	0,738	jun/17	0,492
jul/13	1,115	jul/15	0,738	jul/17	0,492
ago/13	1,115	ago/15	0,615	ago/17	0,492
set/13	1,115	set/15	0,615	set/17	0,492
out/13	1,115	out/15	0,615	out/17	0,492
nov/13	1,115	nov/15	0,615	nov/17	0,492
dez/13	1,000	dez/15	0,615	dez/17	0,492

### 3.4.4 Cenário 3

Para a definição desse cenário, as medidas de gestão tomadas foram:

A vazão inicial retirada foi de 2,0 m<sup>3</sup>/s, vazão maior que a vazão de regularização estabelecida pela ANA, mas menor que a retirada inicialmente no cenário padrão, estabelecendo-se 1,5 m<sup>3</sup>/s para abastecimento humano e 0,5 m<sup>3</sup>/s para irrigação.

Quando o volume do reservatório chegou a 70% do total, medidas de incentivo a diminuição de perdas por parte da CAGEPA foram implantadas, tendo em vista que as mesmas são da ordem de 40% (BRASIL, 2014), valor muito alto em comparação com as perdas encontradas em outras companhias de coleta, tratamento e distribuição de água, diminuindo o volume de perdas em 15%, com isso, há redução nas retiradas, sem que o abastecimento seja afetado.

Quando o volume chegou a 60% da capacidade total de armazenamento, medidas como, por exemplo, campanhas educativas para que a população faça uso racional da água e o incentivo ao uso de equipamentos poupadores, foram aplicadas, diminuindo o consumo humano em 10%, aliado a diminuição na vazão retirada para irrigação para 50% do que era retirado inicialmente.

Suspensão total da irrigação quando o reservatório atingiu a marca de 50% da capacidade de armazenamento total.

Quando o reservatório atingiu 40% da capacidade total de armazenamento, reduziu-se a retirada para consumo humano para 50% do que era retirado inicialmente.

Quando o reservatório atingir 20% do volume total, reduziu-se a retirada para consumo humano para 30% do que era retirado inicialmente.

Dessa forma, os valores de vazões retiradas ao longo dos anos utilizados na simulação do cenário 3, podem ser observados na Tabela 6.

**Tabela 6** - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 3

Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m <sup>3</sup> /s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m <sup>3</sup> /s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m <sup>3</sup> /s)
jan/12	2,000	jan/14	1,083	jan/16	0,750
fev/12	2,000	fev/14	1,083	fev/16	0,750
mar/12	2,000	mar/14	1,083	mar/16	0,750
abr/12	2,000	abr/14	1,083	abr/16	0,750
mai/12	2,000	mai/14	1,083	mai/16	0,450
jun/12	2,000	jun/14	1,083	jun/16	0,450

jul/12	2,000	jul/14	1,083	jul/16	0,450
ago/12	2,000	ago/14	1,083	ago/16	0,450
set/12	2,000	set/14	0,750	set/16	0,450
out/12	2,000	out/14	0,750	out/16	0,450
nov/12	2,000	nov/14	0,750	nov/16	0,450
dez/12	1,775	dez/14	0,750	dez/16	0,450
jan/13	1,775	jan/15	0,750	jan/17	0,450
fev/13	1,775	fev/15	0,750	fev/17	0,450
mar/13	1,775	mar/15	0,750	mar/17	0,450
abr/13	1,775	abr/15	0,750	abr/17	0,450
mai/13	1,334	mai/15	0,750	mai/17	0,450
jun/13	1,334	jun/15	0,750	jun/17	0,450
jul/13	1,334	jul/15	0,750	jul/17	0,450
ago/13	1,334	ago/15	0,750	ago/17	0,450
set/13	1,334	set/15	0,750	set/17	0,450
out/13	1,334	out/15	0,750	out/17	0,450
nov/13	1,083	nov/15	0,750	nov/17	0,450
dez/13	1,083	dez/15	0,750	dez/17	0,450

#### 3.4.5 Cenário 4

Para a simulação desse cenário, as medidas de gestão adotadas podem ser vistas a seguir:

A vazão retirada inicialmente, tanto para abastecimento humano, quanto para irrigação, foi igual àquela retirada realmente nesse período, 1,50 m<sup>3</sup>/s e 0,95 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, totalizando 2,45 m<sup>3</sup>/s. A primeira medida de gestão foi tomada quando o volume do reservatório atingiu 70% do seu volume total, com a diminuição da vazão retirada para irrigação em 50%.

A segunda medida tomada foi a suspensão total da irrigação, quando o volume do reservatório atingiu a marca de 60%. Em seguida, quando o volume do reservatório atingiu 50% do seu volume total, houve diminuição na vazão retirada para consumo humano, de modo que o reservatório conseguisse chegar a dezembro de 2017 com o volume-meta de 15 milhões de m<sup>3</sup> de água, de forma a garantir o abastecimento da população até o possível início da próxima quadra chuvosa, que geralmente ocorre entre os meses de janeiro e maio.

Dessa forma, os valores de vazões retiradas ao longo dos anos utilizados na simulação do cenário 4, podem ser observados na Tabela 7.

**Tabela 7** - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 4

Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)
jan/12	2,450	jan/14	0,800	jan/16	0,800
fev/12	2,450	fev/14	0,800	fev/16	0,800
mar/12	2,450	mar/14	0,800	mar/16	0,800
abr/12	2,450	abr/14	0,800	abr/16	0,800
mai/12	2,450	mai/14	0,800	mai/16	0,800
jun/12	2,450	jun/14	0,800	jun/16	0,800
jul/12	2,450	jul/14	0,800	jul/16	0,800
ago/12	2,450	ago/14	0,800	ago/16	0,800
set/12	1,975	set/14	0,800	set/16	0,800
out/12	1,975	out/14	0,800	out/16	0,800
nov/12	1,975	nov/14	0,800	nov/16	0,800
dez/12	1,975	dez/14	0,800	dez/16	0,800
jan/13	1,500	jan/15	0,800	jan/17	0,800
fev/13	1,500	fev/15	0,800	fev/17	0,800
mar/13	1,500	mar/15	0,800	mar/17	0,800
abr/13	1,500	abr/15	0,800	abr/17	0,800
mai/13	1,500	mai/15	0,800	mai/17	0,800
jun/13	1,500	jun/15	0,800	jun/17	0,800
jul/13	0,800	jul/15	0,800	jul/17	0,800
ago/13	0,800	ago/15	0,800	ago/17	0,800
set/13	0,800	set/15	0,800	set/17	0,800
out/13	0,800	out/15	0,800	out/17	0,800
nov/13	0,800	nov/15	0,800	nov/17	0,800
dez/13	0,800	dez/15	0,800	dez/17	0,800

### 3.4.6 Cenário 5

As medidas de gestão tomadas na simulação desse cenário foram as que seguem:

Inicialmente a vazão retirada, tanto para abastecimento humano, quanto para irrigação, foi igual à que foi retirada realmente nesse período, 1,5 m³/s e 0,95 m³/s, respectivamente, totalizando 2,45 m³/s.

A primeira medida de gestão foi tomada quando o volume do reservatório atingiu 60% do volume total, com suspensão total da irrigação e reduzindo-se a retirada para consumo humano para 80% do seu valor inicial.

A próxima medida foi implantada quando o açude atingiu o nível de 40% do seu volume total de armazenamento, reduzindo-se a retirada para consumo humano para 60% do valor que era retirado inicialmente.

Em seguida, quando o açude atingiu o nível de 30% do volume total, reduziu-se a retirada para abastecimento humano para 50% do que era retirado inicialmente.

Por fim, quando o açude atingiu o nível de 20% do volume total, reduziu-se a retirada para consumo humano para 30% do que era retirado inicialmente.

Dessa forma, os valores de vazões retiradas ao longo dos anos utilizados na simulação do cenário 5, podem ser observados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 5**

Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)
jan/12	2,450	jan/14	1,200	jan/16	0,450
fev/12	2,450	fev/14	1,200	fev/16	0,450
mar/12	2,450	mar/14	1,200	mar/16	0,450
abr/12	2,450	abr/14	1,200	abr/16	0,450
mai/12	2,450	mai/14	1,200	mai/16	0,450
jun/12	2,450	jun/14	1,200	jun/16	0,450
jul/12	2,450	jul/14	0,900	jul/16	0,450
ago/12	2,450	ago/14	0,900	ago/16	0,450
set/12	2,450	set/14	0,900	set/16	0,450
out/12	2,450	out/14	0,900	out/16	0,450
nov/12	2,450	nov/14	0,900	nov/16	0,450
dez/12	2,450	dez/14	0,900	dez/16	0,450
jan/13	2,450	jan/15	0,900	jan/17	0,450
fev/13	2,450	fev/15	0,900	fev/17	0,450
mar/13	1,200	mar/15	0,900	mar/17	0,450
abr/13	1,200	abr/15	0,900	abr/17	0,450
mai/13	1,200	mai/15	0,750	mai/17	0,450
jun/13	1,200	jun/15	0,750	jun/17	0,450
jul/13	1,200	jul/15	0,750	jul/17	0,450
ago/13	1,200	ago/15	0,750	ago/17	0,450
set/13	1,200	set/15	0,750	set/17	0,450
out/13	1,200	out/15	0,750	out/17	0,450
nov/13	1,200	nov/15	0,750	nov/17	0,450
dez/13	1,200	dez/15	0,750	dez/17	0,450

### 3.4.7 Cenário 6

Neste cenário, a medida de gestão tomada foi a utilização de medidas de redução das perdas evaporativas por meio de técnicas disponíveis para esse fim, como mostrado no item 2.8 deste trabalho.

A medida de gestão para o cenário 6 foi a cobertura de uma porcentagem do espelho d'água do reservatório com painéis de energia fotovoltaica flutuantes ou bolas de polietileno, desde o início da simulação, em janeiro de 2012.

As vazões retiradas mensais foram iguais às que aconteceram na realidade, que foram também utilizadas na simulação do cenário padrão e podem ser vistas na Tabela 3, com o objetivo de se obter a diferença no volume de água no reservatório ocasionado apenas pelo acréscimo da utilização de técnicas de redução de evaporação.

Para fins de simulação, neste cenário, a área da superfície do reservatório a ser coberta foi igual a 10% da área de superfície líquida apresentada quando o mesmo está com sua capacidade total de armazenamento de água, o que equivale a uma área de 3,962 km<sup>2</sup>.

### 3.4.8 Cenário 7

Neste cenário, as medidas de gestão tomadas foram as mesmas mostradas na descrição do cenário 1, com o acréscimo de uma medida: a utilização de técnicas de redução de evaporação por meio da cobertura de uma porcentagem do espelho d'água do reservatório desde o início da simulação, em janeiro de 2012, com o objetivo de se obter a diferença no volume de água no reservatório no fim das simulações, ocasionada pela utilização dessa técnicas de redução de evaporação e se fazer um comparativo entre o cenário que as utilizou e o que não as utilizou.

Para se fazer a simulação, a cobertura da superfície do reservatório nesse cenário foi igual a 10% da área de superfície líquida apresentada quando o mesmo está com sua capacidade total de armazenamento de água, o equivalente a uma área de 3,962 km<sup>2</sup>.

As vazões retiradas mensais, de modo a atender as medias de gestão tomadas nesse cenário, podem ser vistas na Tabela 9.

**Tabela 9** - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 7

Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m³/s)
jan/12	1,85	jan/14	1,11	jan/16	0,925
fev/12	1,85	fev/14	1,11	fev/16	0,74
mar/12	1,85	mar/14	1,11	mar/16	0,74
abr/12	1,85	abr/14	1,11	abr/16	0,74
mai/12	1,85	mai/14	1,11	mai/16	0,74
jun/12	1,85	jun/14	1,11	jun/16	0,74
jul/12	1,85	jul/14	1,11	jul/16	0,74
ago/12	1,85	ago/14	1,11	ago/16	0,74
set/12	1,85	set/14	1,11	set/16	0,74
out/12	1,85	out/14	1,11	out/16	0,74
nov/12	1,85	nov/14	1,11	nov/16	0,74
dez/12	1,85	dez/14	1,11	dez/16	0,74
jan/13	1,85	jan/15	1,11	jan/17	0,74
fev/13	1,50	fev/15	1,11	fev/17	0,74
mar/13	1,50	mar/15	1,11	mar/17	0,74
abr/13	1,50	abr/15	1,11	abr/17	0,74
mai/13	1,50	mai/15	0,925	mai/17	0,74
jun/13	1,50	jun/15	0,925	jun/17	0,74
jul/13	1,50	jul/15	0,925	jul/17	0,74
ago/13	1,50	ago/15	0,925	ago/17	0,74
set/13	1,11	set/15	0,925	set/17	0,74
out/13	1,11	out/15	0,925	out/17	0,74
nov/13	1,11	nov/15	0,925	nov/17	0,74
dez/13	1,11	dez/15	0,925	dez/17	0,74

#### 3.4.9 Cenário 8

As medidas de gestão nesse cenário foram definidas de modo que não houvesse racionamento para a população em nenhum momento do período simulado. As medidas de gestão tomadas foram a diminuição da vazão retirada para irrigação em 50% do que era retirado inicialmente em julho de 2013, a suspensão total da mesma em julho de 2014, da mesma forma que ocorreu no cenário padrão do sistema e, a partir desse ponto, as retiradas seriam de modo a abastecer a população sem a necessidade de haver racionamento para a mesma. Para que isso fosse possível a medida de gestão adicional utilizada foi a implementação das técnicas de redução de perdas evaporativas já mencionadas na definição dos cenários anteriores. Nesse caso, a área da superfície do reservatório a ser coberta foi igual a 20% da área de superfície líquida apresentada quando



o mesmo está com sua capacidade total de armazenamento de água, o que equivale a uma área de 7,924 km<sup>2</sup>. As vazões retiradas do reservatório ao longo do tempo na simulação desse cenário podem ser vistas na Tabela 10.

**Tabela 10** - Dados de vazões retiradas utilizados na simulação do cenário 8

Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m <sup>3</sup> /s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m <sup>3</sup> /s)	Data	Vazões retiradas utilizadas na simulação (m <sup>3</sup> /s)
jan/12	2,450	jan/14	1,975	jan/16	1,500
fev/12	2,450	fev/14	1,975	fev/16	1,500
mar/12	2,450	mar/14	1,975	mar/16	1,500
abr/12	2,450	abr/14	1,975	abr/16	1,500
mai/12	2,450	mai/14	1,975	mai/16	1,500
jun/12	2,450	jun/14	1,975	jun/16	1,500
jul/12	2,450	jul/14	1,500	jul/16	1,500
ago/12	2,450	ago/14	1,500	ago/16	1,500
set/12	2,450	set/14	1,500	set/16	1,500
out/12	2,450	out/14	1,500	out/16	1,500
nov/12	2,450	nov/14	1,500	nov/16	1,500
dez/12	2,450	dez/14	1,500	dez/16	1,500
jan/13	2,450	jan/15	1,500	jan/17	1,500
fev/13	2,450	fev/15	1,500	fev/17	1,500
mar/13	2,450	mar/15	1,500	mar/17	1,500
abr/13	2,450	abr/15	1,500	abr/17	1,500
mai/13	2,450	mai/15	1,500	mai/17	1,500
jun/13	2,450	jun/15	1,500	jun/17	1,500
jul/13	1,975	jul/15	1,500	jul/17	1,500
ago/13	1,975	ago/15	1,500	ago/17	1,500
set/13	1,975	set/15	1,500	set/17	1,500
out/13	1,975	out/15	1,500	out/17	1,500
nov/13	1,975	nov/15	1,500	nov/17	1,500
dez/13	1,975	dez/15	1,500	dez/17	1,500

### 3.5 Dados de entrada

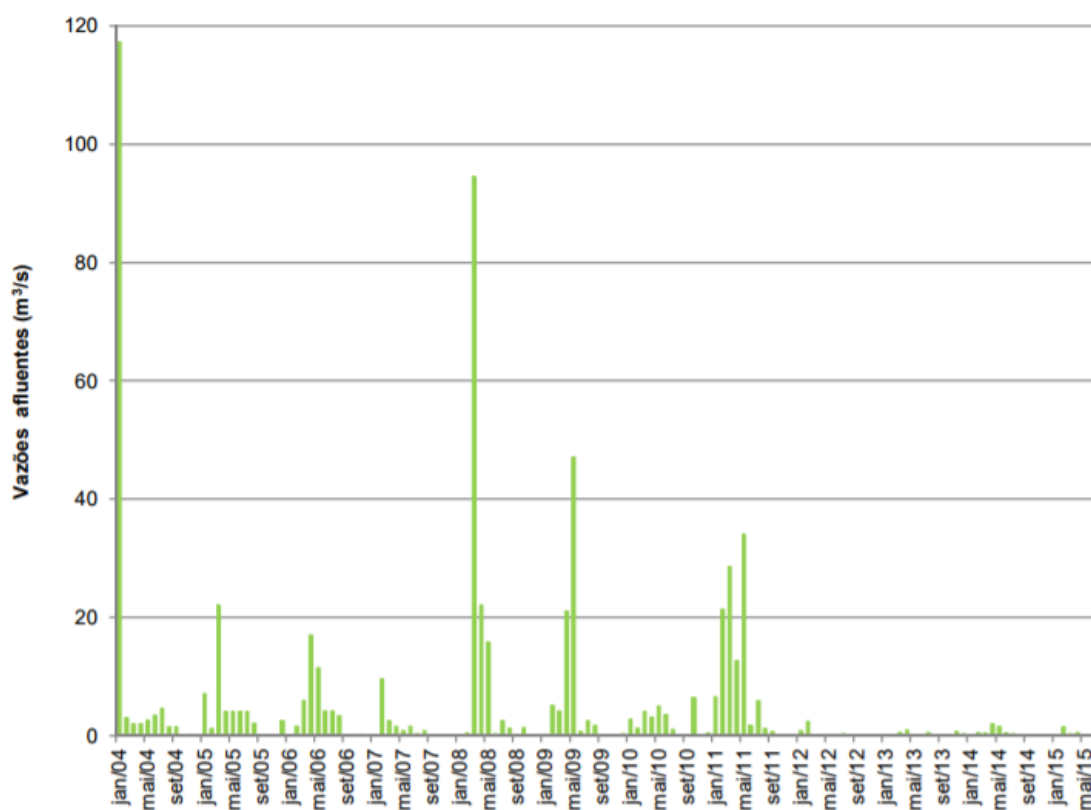
Para realização das simulações dos cenários, foi necessário alimentar o modelo matemático com dados de entrada, são eles: tempo de duração da simulação, que foi de 63 meses, iniciando-se em janeiro de 2012 e com término em março de 2017, período que compreende a atual crise hídrica desde o seu início, para que as comparações entre os resultados dos cenários simulados e a situação real pudessem ser feitas, tendo em vista que em abril de 2017 o sistema recebeu o aporte de águas do Projeto de Integração do Rio

São Francisco, fato que não é objeto de estudo desse trabalho; volume inicial, volume mínimo e volume máximo do reservatório, que são, respectivamente, 373.957.564m<sup>3</sup>, 10.000.000m<sup>3</sup>, volume equivalente a 2,4% do volume total, estabelecido pela ANA como menor nível em que se pode retirar água do reservatório para abastecimento, e 411.686.287m<sup>3</sup>; vazões retiradas do reservatório mensalmente, que foram mostradas no item anterior para o caso dos 8 cenários simulados; vazões afluentes, dados de evaporação e da curva cota-área-volume do reservatório, que são detalhados nos itens seguintes.

### 3.5.1 Vazões Afluentes

A série de vazões afluentes utilizada nesse estudo pode ser vista na Figura 7. Calculada por meio de balanço hídrico por Nunes (2015), fundamentado nas medições diárias do volume remanescente no açude, fornecidas pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA. Os valores para vazões afluentes, após o período apresentado na Figura 7, foram muito baixos e para efeitos de simulação foram desconsiderados, pois não ocasionavam mudanças nos resultados obtidos.

**Figura 7** – Série histórica de vazões afluentes ao açude Eptácio Pessoa



Fonte: AESA (2015).

### 3.5.2 Evaporação

A medição da lâmina evaporada no próprio reservatório Eptácio Pessoa é inexistente, por esta razão, foram utilizados dados médios de evaporação mensais de tanque evaporimétrico Classe A, coletados na Bacia Escola de São João do Cariri da Universidade Federal de Campina Grande. Essa série é considerada representativa devido à proximidade com o reservatório e às características semelhantes de clima, vegetação e relevo. Para a correção dos valores medidos no tanque Classe A, foram utilizados coeficientes ( $K_p$ ) calculados por Oliveira *et al.* (2005) para o próprio reservatório de Boqueirão, onde são utilizados coeficientes diferentes do valor comumente utilizado de 0,7 e sazonais, visto que cada época do ano apresenta condições climáticas, de radiação, condições de umidade do ar, ação do vento e temperatura do ar, entre outras características associadas ao microclima de cada local diferentes. As médias mensais de lâminas evaporadas utilizadas nas simulações podem ser observadas na Figura 8.

**Figura 8** – Médias mensais de lâminas evaporadas



Fonte: Nunes (2015)

### 3.5.3 Curva cota-área-volume

Os dados da curva cota-área-volume do reservatório Eptácio Pessoa, como podem ser vistos em forma de tabela na Tabela 11 e em forma de gráfico na Figura 9,

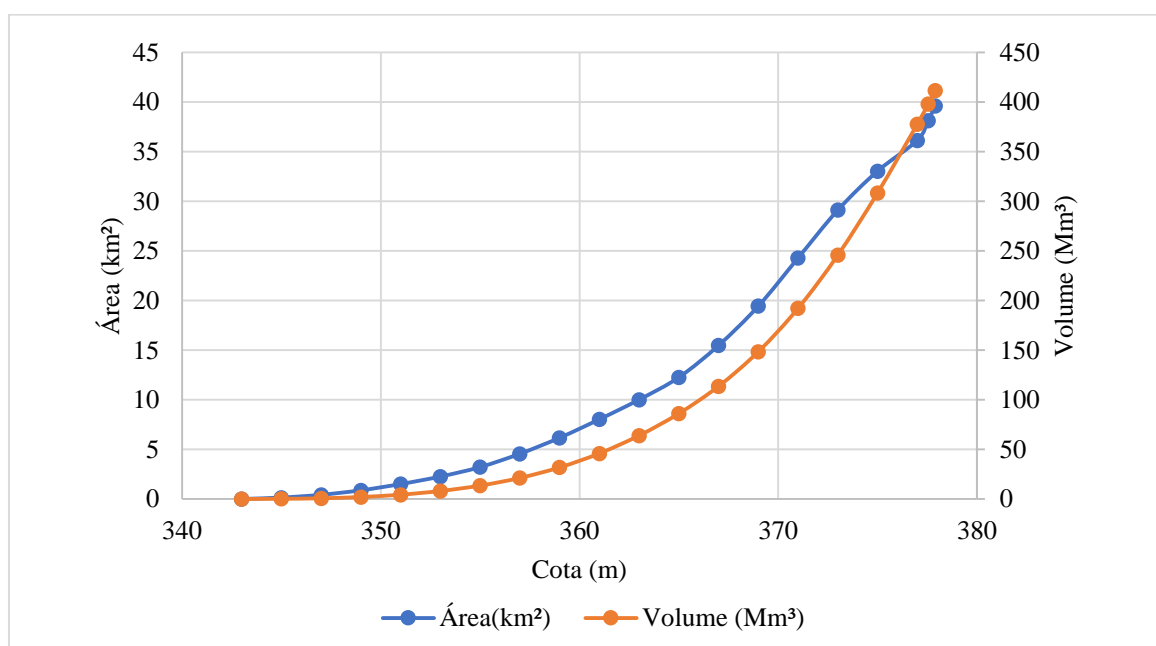
foram obtidos junto à AESA e gerados a partir de levantamento batimétrico realizado pela agência em 2004.

**Tabela 11** – Valores da curva cota-área-volume do reservatório Epitácio Pessoa

Ponto da curva	Cota (m)	Área(km <sup>2</sup> )	Volume (Mm <sup>3</sup> )
1	343,000	0,000	0,000
2	345,000	0,143	0,174
3	347,000	0,422	0,708
4	349,000	0,874	1,981
5	351,000	1,506	4,314
6	353,000	2,261	8,058
7	355,000	3,217	13,478
8	357,000	4,557	21,218
9	359,000	6,168	31,819
10	361,000	8,029	45,935
11	363,000	10,013	63,965
12	365,000	12,260	86,139
13	367,000	15,486	113,650
14	369,000	19,443	148,505
15	371,000	24,290	192,185
16	373,000	29,120	245,796
17	375,000	33,047	308,486
18	377,000	36,143	377,846
19	377,550	38,136	397,991
20	377,900	39,623	411,686

Fonte: AESA (2004).

**Figura 9** – Gráfico da curva cota-área-volume do reservatório Epitácio Pessoa



## 4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados encontrados nas simulações do cenário padrão, utilizado para calibração do modelo, e dos oito cenários apresentados nos itens 3.4.1 a 3.4.9. Para a realização das simulações citadas, o modelo foi alimentado com os dados de entrada comuns a todas elas, que podem ser vistos no item 3.5 e, para o caso específico de cada cenário, com as vazões retiradas mensalmente, que foram apresentadas na definição de cada um desses cenários.

### 4.1 Simulação do Cenário Padrão

A simulação do cenário padrão foi feita, e as vazões de retirada mensal do reservatório utilizadas foram iguais às que aconteceram na realidade (Tabela 12) com o objetivo de realizar a calibração do modelo, ou seja, verificar se os resultados finais apresentados pelo modelo matemático são compatíveis com os dados que de fato foram observados na situação real.

A calibração é um processo que busca igualar os hidrogramas simulados em relação aos observados, contribuindo para a precisão dos resultados gerados pelo modelo. Na validação verifica-se se o modelo representa bem a realidade da bacia, verificando a qualidade da aplicação (ALBUQUERQUE, 2008).

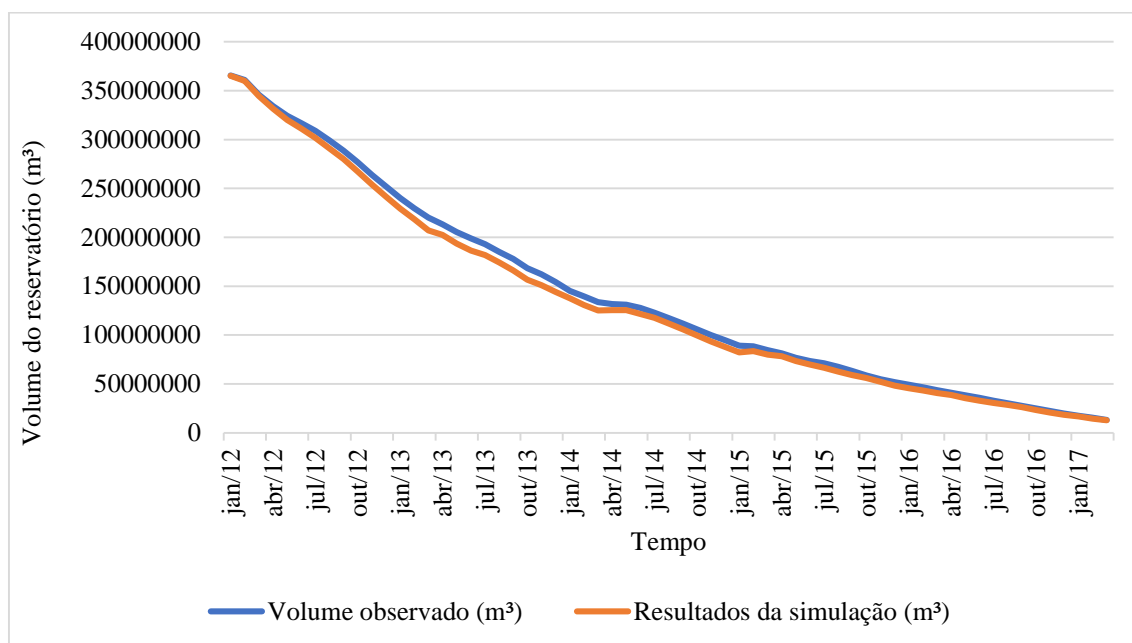
**Tabela 12** - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário padrão

CENÁRIO PADRÃO - VAZÕES UTILIZADAS							
TEMPO	jan/12	jul/13	jul/14	dez/14	jun/15	nov/15	jul/16
VAZÃO RETIRADA (m <sup>3</sup> /s)	2,450	1,975	1,500	1,352	1,084	0,881	0,650

Os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real podem ser observados na Figura 10. Observa-se que as diferenças encontradas entre os valores simulados e a situação real são muito próximos, apresentando coeficiente de correlação de 0,99 (para o caso do coeficiente de correlação, quanto mais próximo de 1, mais correlacionadas estão as variáveis) e com diferenças percentuais máximas de 6%, fato que pode ser explicado, por exemplo, pela utilização de valores de lâminas evaporadas aproximadas para a região, visto que não se tem valores exatos medidos no

próprio reservatório e por retiradas sem outorga, e por isso, sem conhecimento dos órgãos gestores, que fazem com os valores dos dados fornecidos das retiradas totais no reservatório possam ser diferentes dos que de fato acontecem. Sendo assim, pode-se dizer que estes resultados indicam que o modelo representa adequadamente a situação que se deseja modelar.

**Figura 10 – Resultados da simulação do cenário padrão**



## 4.2 Simulação do Cenário 1

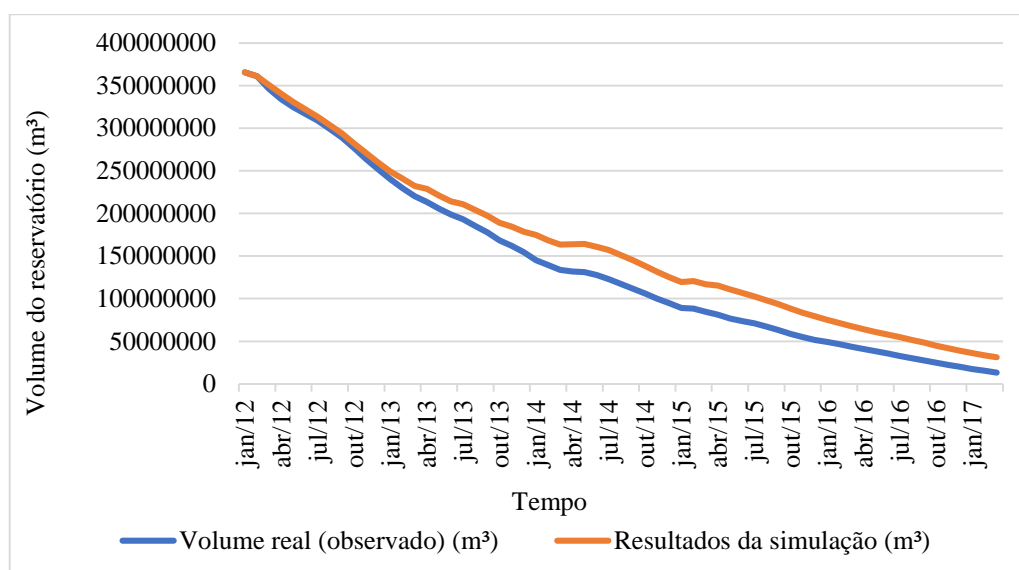
Para a simulação do cenário 1, as vazões de retirada mensal do reservatório utilizadas foram tais que as medidas de gestão propostas nesse cenário fossem atendidas, como pode ser visto na Tabela 13.

**Tabela 13 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 1**

CENÁRIO 1 - REGIME DE RACIONAMENTO						
TEMPO	jan/12	fev/13	ago/13	jan/15	dez/15	nov/16
VAZÃO RETIRADA (m³/s)	1,850	1,500	1,110	0,925	0,740	0,550

Os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real podem ser observados na Figura 11.

**Figura 11 - Resultados da simulação do cenário 1**



Esse cenário atingiu um volume final, em março de 2017, de 31,091 Mm³ de água, o equivalente a 237% do volume que o reservatório realmente chegou nesse período. O tempo que esse cenário levaria para atingir o menor volume atingido pelo cenário real seria de oito meses, garantindo assim o abastecimento da população por um maior período.

#### 4.3 Simulação do Cenário 2

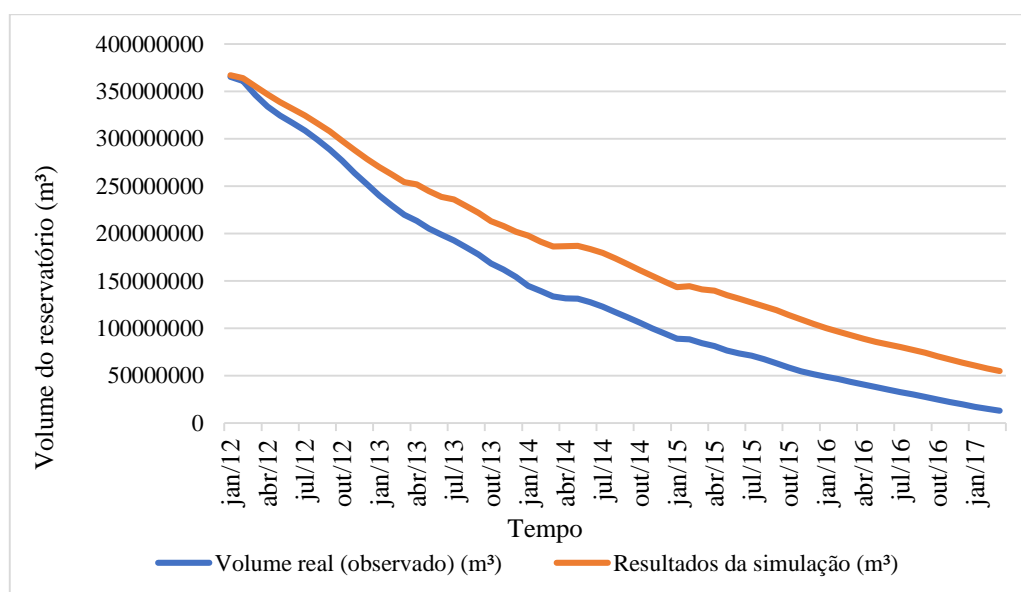
No caso do cenário 2, as vazões de retirada mensal do reservatório utilizadas foram tais que as medidas de gestão propostas nesse cenário fossem atendidas, como pode ser visto na Tabela 14.

**Tabela 14 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 2**

CENÁRIO 2 - REGIME DE RACIONAMENTO						
TEMPO	jan/12	nov/12	dez/13	out/14	ago/15	jul/16
VAZÃO RETIRADA (m³/s)	1,230	1,115	1,000	0,738	0,615	0,492

Os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real podem ser observados na Figura 12.

**Figura 12 - Resultados da simulação do cenário 2**



O volume final atingido por esse cenário no fim da simulação foi de 55,082 Mm<sup>3</sup> de água, o equivale a 420% do volume que o reservatório realmente chegou nesse período, sendo o cenário que chegou ao fim com o maior volume de água armazenado. O tempo que esse cenário levaria para atingir o menor volume atingido pelo cenário real seria de quinze meses.

#### 4.4 Simulação do Cenário 3

Neste cenário, as vazões de retirada mensal do reservatório utilizadas foram tais que as medidas de gestão propostas para o mesmo e mostradas no item anterior fossem atendidas, como mostra a Tabela 15.

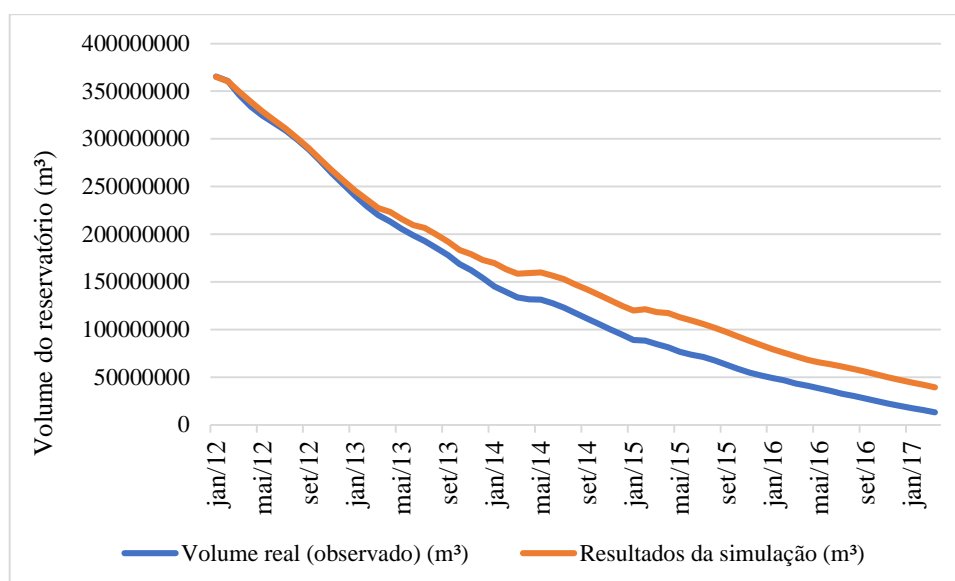
**Tabela 15 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 3**

CENÁRIO 3 - REGIME DE RACIONAMENTO						
TEMPO	jan/12	dez/12	mai/13	nov/13	set/14	mai/16
VAZÃO RETIRADA (m³/s)	2,000	1,775	1,334	1,083	0,750	0,450

Os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real podem ser observados na Figura 13.



**Figura 13 - Resultados da simulação do cenário 3**



O volume final atingido por esse cenário no fim da simulação foi de 39,449 Mm<sup>3</sup> de água, o equivale a 301% do volume que o reservatório realmente chegou nesse período. Para atingir o menor volume atingido pelo cenário real, esse cenário levaria um tempo de doze meses.

#### 4.5 Simulação do Cenário 4

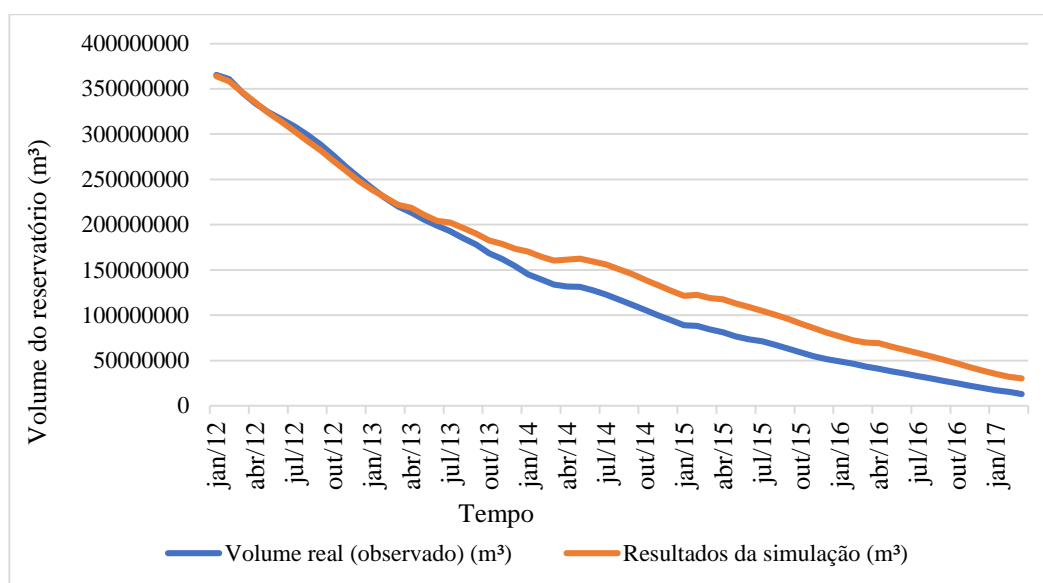
As vazões de retirada mensal do reservatório utilizadas na simulação deste cenário foram tais que as medidas de gestão propostas no mesmo fossem atendidas, como pode ser visto na Tabela 16.

**Tabela 16 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 4**

CENÁRIO 4 - REGIME DE RACIONAMENTO				
TEMPO	jan/12	set/12	jan/13	jul/13
VAZÃO RETIRADA (m³/s)	2,450	1,975	1,500	0,800

Os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real podem ser observados na Figura 14.

**Figura 14 - Resultados da simulação do cenário 4**



Esse cenário atingiu um volume final, em março de 2017, de 38,093 Mm³ de água, o equivalente a 290% do volume que o reservatório realmente chegou nesse período. Esse volume armazenado no fim da simulação levaria dez meses para se igualar ao volume observado no cenário real no fim da simulação.

#### 4.6 Simulação do Cenário 5

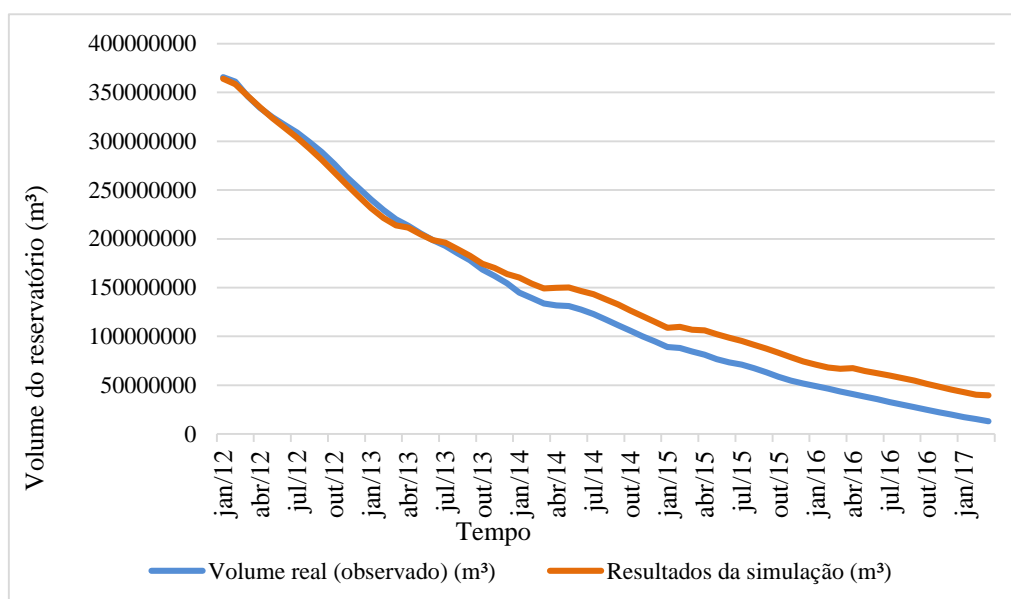
De modo a atender as medidas de gestão propostas nesse cenário, as vazões de retirada mensal do reservatório utilizadas na simulação do mesmo podem ser vistas na Tabela 17.

**Tabela 17 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 5**

CENÁRIO 5 - REGIME DE RACIONAMENTO					
TEMPO	jan/12	mar/13	jul/14	mai/15	jan/16
VAZÃO RETIRADA (m³/s)	2,450	1,200	0,900	0,750	0,450

Os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real podem ser observados na Figura 15.

**Figura 15 - Resultados da simulação do cenário 5**



Observa-se que o volume final atingido utilizando as medidas de gestão propostas por este cenário foi de 39,547Mm<sup>3</sup> de água, o equivalente a 302% do volume que o reservatório realmente chegou nesse período. Para atingir o menor volume atingido pelo cenário real, esse cenário levaria um tempo de treze meses.

#### 4.7 Simulação do Cenário 6

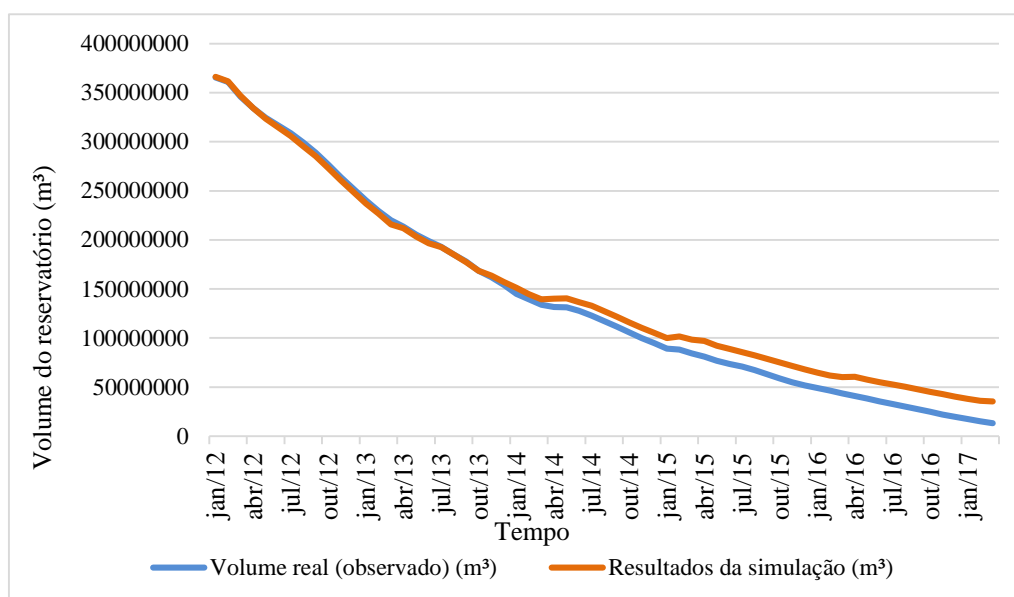
A Tabela 18 mostra as demandas mensais utilizadas na simulação do cenário 6, de modo a atender as medidas de gestão propostas para o mesmo e que foram mostradas na definição do cenário.

**Tabela 18 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 6**

CENÁRIO 6 - VAZÕES UTILIZADAS							
TEMPO	jan/12	jul/13	jul/14	dez/14	jun/15	nov/15	Jul/15
VAZÃO RETIRADA (m³/s)	2,450	1,975	1,500	1,352	1,084	0,881	0,650

A Figura 16 apresenta os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real.

**Figura 16 - Resultados da simulação do cenário 6**



Neste cenário, o volume final atingido no final da simulação foi de 35,376 Mm<sup>3</sup> de água, volume que é equivalente a 270% do volume que o reservatório realmente atingiu. O tempo que esse cenário levaria para atingir o menor volume atingido pelo cenário real seria de doze meses.

#### 4.8 Simulação do Cenário 7

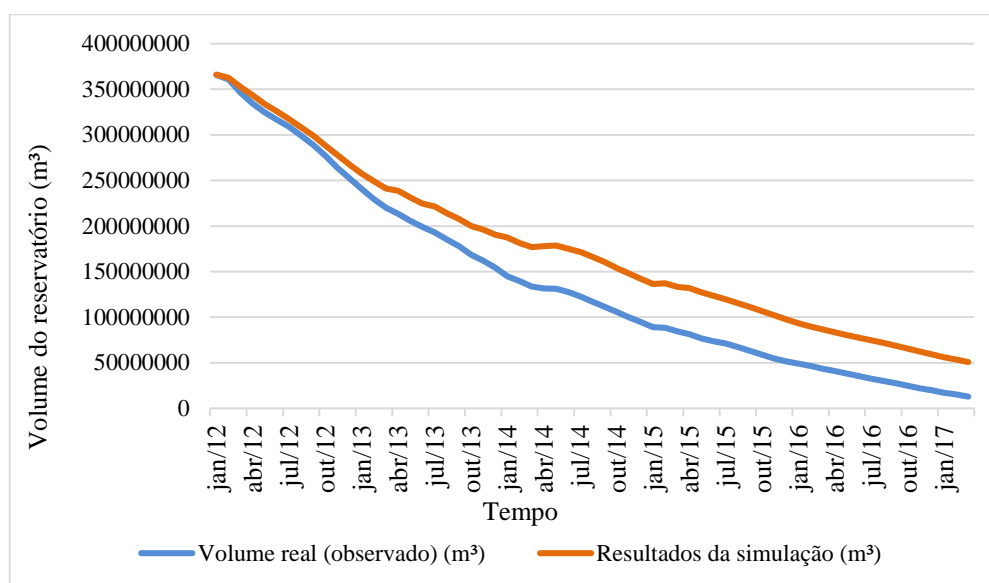
Para a simulação do cenário 7, as vazões de retirada mensal do reservatório utilizadas foram tais que as medidas de gestão propostas nesse cenário fossem atendidas, de acordo com a Tabela 19.

**Tabela 19 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 7**

CENÁRIO 7 - VAZÕES UTILIZADAS					
TEMPO	jan/12	fev/13	set/13	mai/15	fev/16
VAZÃO RETIRADA (m³/s)	1,850	1,500	1,110	0,925	0,740

A Figura 17 apresenta os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real.

**Figura 17 - Resultados da simulação do cenário 7**



O volume final atingido por esse cenário no fim da simulação foi de 50,804 Mm³ de água, o equivale a 388% do volume que o reservatório realmente chegou nesse período. Esse volume armazenado no fim da simulação levaria dezesseis meses para se igualar ao volume observado no cenário real no fim da simulação.

#### 4.9 Simulação do Cenário 8

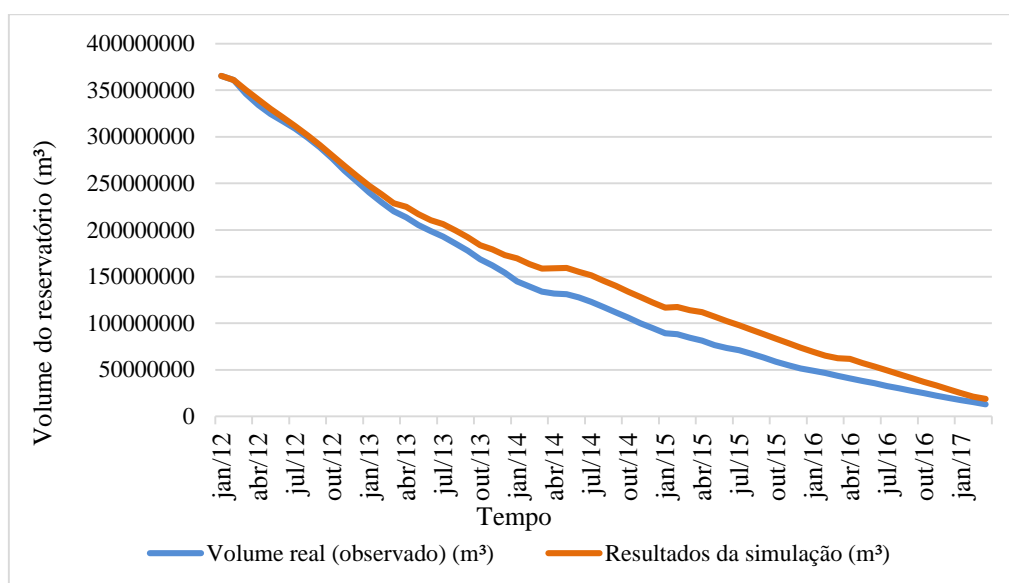
Neste cenário, as vazões de retirada mensal do reservatório utilizadas foram tais que as medidas de gestão propostas anteriormente para o mesmo fossem atendidas, como pode ser visto na Tabela 20.

**Tabela 20 - Vazões utilizadas ao longo do tempo na simulação do cenário 8**

CENÁRIO 8 - VAZÕES UTILIZADAS			
TEMPO	jan/12	jul/13	jul/14
VAZÃO RETIRADA (m³/s)	2,450	1,975	1,50

A Figura 18 apresenta os resultados da simulação desse cenário em comparação com a situação real.

**Figura 18 - Resultados da simulação do cenário 8**



A partir dos resultados da simulação desse cenário, observa-se que o volume final atingido utilizando as medidas de gestão propostas foi de 18,901 Mm<sup>3</sup> de água, o equivalente a 144% do volume que o reservatório realmente chegou nesse período. Esse cenário levaria um tempo de dois meses para atingir o mesmo volume armazenado que o cenário real apresentou no fim da simulação.

## **5. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Para se proceder a análise dos resultados encontrados com as simulações no modelo matemático AcquaNet e, dessa forma, identificar os cenários que teriam causados os melhores impactos na situação de crise hídrica estudada, foram utilizados indicadores de sustentabilidades para reservatórios.

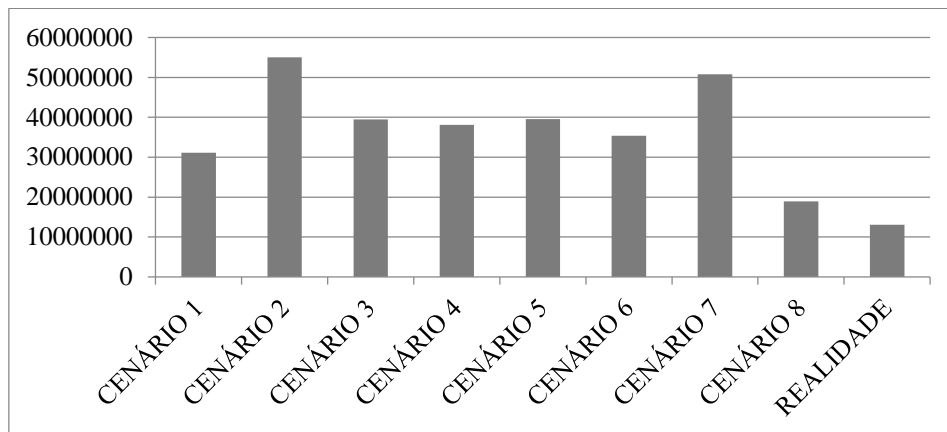
Outros valores também observados foram: o volume final que o reservatório chegou no final do período usado na simulação, valor que pode ser comparado com o volume real que o reservatório chegou, indicando a dimensão do impacto de cada cenário na situação de crise hídrica e racionamento enfrentados, o atendimento médio em  $\text{m}^3/\text{s}$  para cada cenário, valor que mensura o impacto da aplicação das medidas de cada cenário no problema de racionamento enfrentado pela população, bem como o tempo em meses que cada cenário levaria para atingir o mesmo volume armazenado que o reservatório realmente apresentou no fim da simulação (março de 2017), valor que mostra quanto tempo a mais de abastecimento para a população cada cenário garantiria.

A seguir são mostrados os valores dos volumes finais, atendimentos médios e dos índices de sustentabilidade, calculados como mostrado na revisão bibliográfica, no item 2.5, para cada um dos oito cenários simulados e feita uma comparação com os valores da situação real.

### **5.1 Volume final**

A Figura 19 apresenta os valores encontrados nas simulações para os volumes finais de cada cenário em março de 2017, em  $\text{m}^3$ , em comparação com o volume real observado no reservatório nesse mesmo período.

**Figura 19** - Comparativo entre os volumes finais em m<sup>3</sup> obtidos em cada cenário



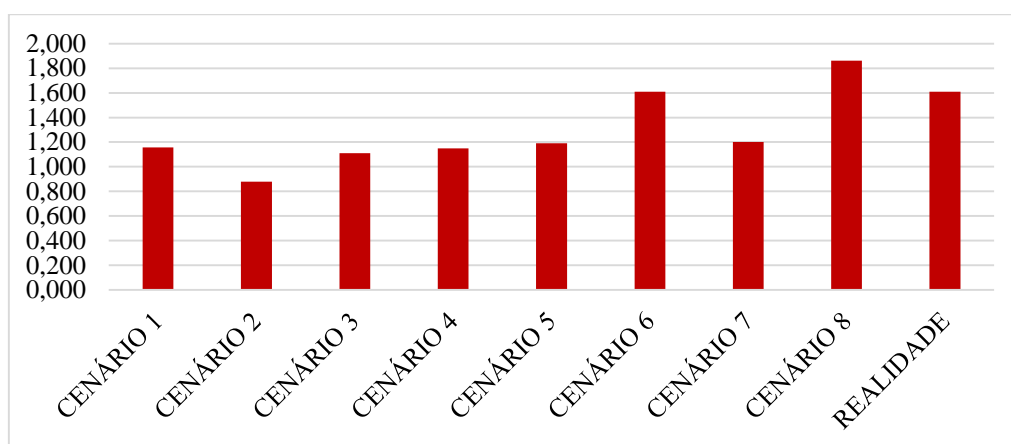
Os valores dos volumes finais com os quais cada cenário chegou ao fim da simulação, em março de 2017, 31091000m<sup>3</sup>, 55082000m<sup>3</sup>, 39449000m<sup>3</sup>, 38093000m<sup>3</sup>, 39547000m<sup>3</sup>, 35376000m<sup>3</sup>, 50804000m<sup>3</sup> e 18901000m<sup>3</sup>, respectivamente, são muito maiores que o volume observado para a situação real do reservatório, que é de apenas 13094571m<sup>3</sup>. O tempo que cada cenário levaria para atingir esse mesmo volume armazenado, seguindo o mesmo modelo de racionamento que vinha sendo aplicado até lá, seria: para o cenário 1, oito meses; para o cenário 2, quinze meses; para o cenário 3, doze meses; para o cenário 4, dez meses; para o cenário 5, treze meses; para o cenário 6, doze meses; para o cenário 7, dezesseis meses; e para o cenário 8, dois meses. Então, nesse caso, se considerássemos apenas as variáveis Volume Final e Tempo para atingir o volume final real, o melhor cenário seria o cenário 7.

## 5.2 Atendimento médio

A Figura 20 mostra os valores encontrados nas simulações para o atendimento médio, em m<sup>3</sup>/s, definido como a média das vazões mensais retiradas do reservatório, de cada cenário em comparação com o volume real observado no mesmo período no reservatório.



**Figura 20** - Comparativo entre os atendimentos médios encontrados em cada cenário



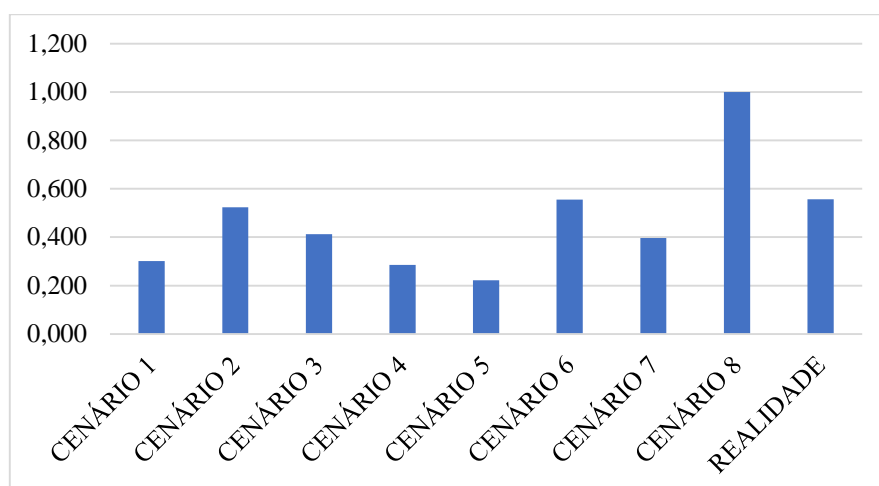
Os atendimentos médios utilizados nos cenários simulados variaram entre 0,880 m³/s (cenário 2) e 1,860 m³/s (cenário 8), enquanto que o atendimento médio do cenário real foi de 1,610 m³/s. O cenário 2 foi o que teve o menor atendimento médio, isso explica em parte o fato de este ter sido o cenário que chegou ao final da simulação com o maior volume de água armazenado.

Considerando agora as três variáveis apresentadas, confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, o melhor cenário teria sido o Cenário 6.

### 5.3 Confiabilidade

Os valores encontrados nas simulações para a confiabilidade, calculados como mostrado anteriormente para este índice, em cada cenário simulado podem ser observados na Figura 21.

**Figura 21** - Comparativo entre as confiabilidades encontradas em cada cenário

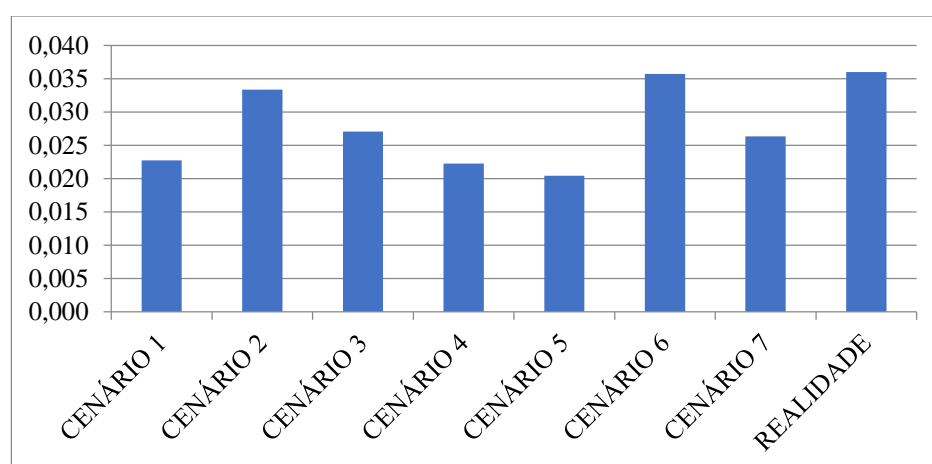


Como a confiabilidade representa a probabilidade de um sistema atender a uma demanda de água previamente estabelecida e mede a percentagem do tempo em que o sistema funciona sem falhas durante o horizonte de operação, o cenário que obteve o maior valor de confiabilidade foi o cenário 8, tendo em vista que ele foi definido de modo que a população não fosse submetida a regimes de racionamento, portanto, não apresentou falhas.

#### 5.4 Resiliência

Para o índice resiliência, os valores encontrados nas simulações de todos os cenários estão apresentados na Figura 22.

**Figura 22** - Comparativo entre as resiliências encontradas em cada cenário

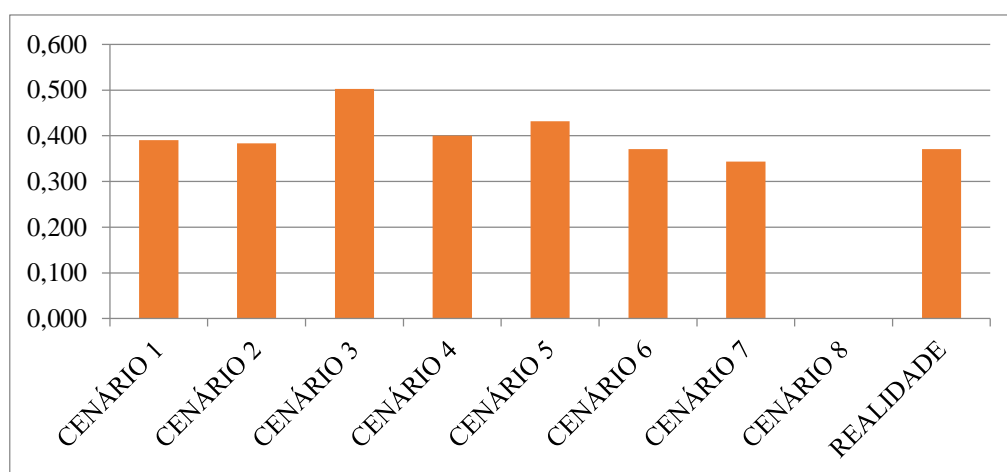


Por definição, a resiliência indica a velocidade de recuperação de uma condição insatisfatória de um sistema, medindo a forma como o sistema se recupera de uma falha, uma vez que esta tenha ocorrido. Como em todos os cenários simulados, uma vez que o sistema entrou em falha, ele não se recuperou, os valores calculados para a resiliência foram baixos e muito próximos entre si. Com exceção do cenário 8, que, como explicado anteriormente e de acordo com sua definição, não apresentou falhas, portanto possui resiliência de 1.

## 5.5 Vulnerabilidade

A Figura 23 apresenta os valores encontrados nas simulações para a vulnerabilidade de cada cenário simulado.

**Figura 23** - Comparativo entre as vulnerabilidades encontradas em cada cenário

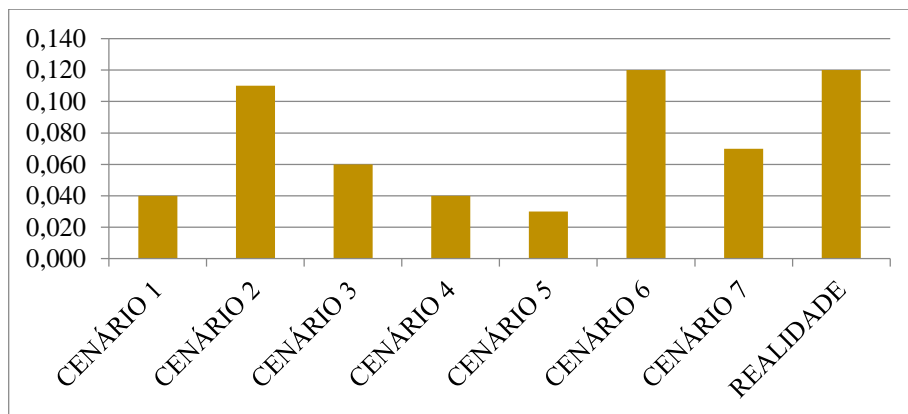


A vulnerabilidade, ou percentual volumétrico de falha, mede a magnitude da falha, quando esta ocorre, quanto maior o valor encontrado para a vulnerabilidade, mais danosas as falhas são para o sistema. Por não apresentar falhas, o cenário 8 tem vulnerabilidade zero. Entre os demais cenários, o que apresentou a maior vulnerabilidade foi o cenário 3, mesmo o cenário 2 tendo apresentado o menor atendimento médio. Sabe-se que o atendimento médio e a vulnerabilidade são grandezas inversamente proporcionais, mas isso não ocorre na comparação entre os cenários 2 e 3, pois, na definição do cenário 2 as vazões iniciais utilizadas foram muito baixas, fazendo com que o percentual volumétrico de falha não variasse muito durante a simulação, pois não houve grande variação entre a vazão inicial, que já foi muito baixa, e as demais utilizadas no período simulado.

## 5.6 Sustentabilidade

Os valores encontrados nas simulações para a sustentabilidade hídrica calculada para cada cenário simulado podem ser vistos na Figura 24.

**Figura 24** - Comparativo entre as sustentabilidades calculadas para cada cenário



A sustentabilidade combina os valores calculados para os índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, com o objetivo de apresentar uma visão mais abrangente do funcionamento do sistema estudado. O cenário que apresentou a maior sustentabilidade foi o cenário 8, com sustentabilidade igual a 1, por não submeter a população a regimes de racionamento e apresentar um alto valor de atendimento médio. A segunda maior sustentabilidade foi encontrada no cenário 6, que apresenta também um alto valor de atendimento médio.

A Tabela 21 mostra um comparativo geral entre todos os índices calculados, os volumes finais e atendimentos médios encontrados para todos os cenários, em cada uma das simulações realizadas, assim como também apresenta o tempo em meses que cada cenário levaria para atingir o mesmo volume armazenado que o reservatório realmente apresentou no fim do período estudado (13,09 Mm<sup>3</sup>), em março de 2017.

**Tabela 21** - Comparativo entre todos os indicadores encontrados em cada cenário simulado

	CEN. 1	CEN. 2	CEN. 3	CEN. 4	CEN. 5	CEN. 6	CEN. 7	CEN. 8	REALIDADE
VOLUME FINAL (Mm³)	31,091	55,082	39,449	38,093	39,547	35,376	50,804	18,901	13,09
CONFIABILIDADE	0,302	0,524	0,413	0,286	0,222	0,556	0,397	1,000	0,556
RESILIÊNCIA	0,023	0,033	0,027	0,022	0,020	0,036	0,026	1,000	0,036
VULNERABILIDADE	0,391	0,384	0,503	0,400	0,432	0,371	0,344	0,000	0,371
SUSTENTABILIDADE	0,04	0,11	0,06	0,04	0,03	0,12	0,07	1,000	0,120
ATENDIMENTO MÉDIO (m³/s)	1,158	0,880	1,110	1,150	1,190	1,610	1,200	1,86	1,61
TEMPO QUE LEVARIA PARA ATINGIR O MESMO VOLUME QUE O CENÁRIO REAL APRESENTOU NO FIM DO PERÍODO ESTUDADO (meses)	8	15	12	10	13	12	16	2	-

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com a implementação de um modelo eficiente de gestão dos recursos hídricos, limitando as retiradas do reservatório às vazões outorgadas, fiscalizando tais retiradas, inclusive nos anos de maiores afluências, com incentivo a medidas de combate a perdas e ao uso racional da água, respeitando as determinações da lei 9.433/1997 e o PERH-PB, e com a utilização de técnicas de diminuição das perdas evaporativas, o açude Epitácio Pessoa não teria atingindo um volume de água armazenada tão preocupante e próximo ao colapso total no abastecimento público de água a uma população de mais de meio milhão de habitantes.

Os resultados obtidos nesse estudo, nos quais foram testadas alguns cenários com diferentes medidas de gestão hídrica, ratificam o pressuposto de que, em regiões com alta variabilidade hidrológica, localizadas no semiárido, região com altos índices de evaporação, e que utilizam reservatórios com baixas vazões de regularização, a gestão eficiente desses recursos tem impactos significativos na manutenção de um volume de água armazenada que possa garantir o abastecimento de água para a população por um maior período de tempo e, conseqüentemente, na atenuação dos problemas causados por uma situação de crise hídrica e racionamento prolongado.

Os valores dos volumes finais com os quais cada cenário chegou ao fim da simulação, em março de 2017, foram muito maiores que o volume observado para a situação real do reservatório, garantindo o abastecimento da população por períodos que chegam a até dezesseis meses, contados a partir do fim das simulações, fato que ratifica a importância e a eficiência de uma boa gestão na operação de reservatórios.

Analisando conjuntamente os cenários de 1 a 5, uma vez que eles são os cenários para os quais as medidas de gestão adotadas não incluem técnicas de redução de evaporação que, para serem implantadas, necessitariam de recursos financeiros substanciais, pode-se observar que o cenário que obteve o índice de sustentabilidade maior e vulnerabilidade menor foi o cenário 2, sendo também o que chegou ao fim da simulação com o maior volume de água armazenada, 55082000m<sup>3</sup>, enquanto que o volume real que o reservatório se encontrava nesse mesmo período de tempo era 13094571m<sup>3</sup>, ou seja, caso esse cenário tivesse sido posto em prática, o reservatório teria chegado em março de 2017 com um volume de água armazenada equivalente a 420% do volume real. Esse cenário só atingiria o mesmo volume que o sistema realmente atingiu em março de 2017, em junho de 2018, seguindo o mesmo modelo de racionamento até

esta data, ou seja, garantiria mais 15 meses de abastecimento. Isto se deve em parte ao fato de esse cenário ser o que apresenta o menor valor de atendimento médio, uma vez que o volume de água retirado do reservatório seria baixo desde o começo da simulação.

Dados relevantes podem ser observados a partir da análise e comparação entre os cenários 1 e 7, tendo em vista que, em ambos, as medidas de gestão que afetam a população, como racionamento e suspensão da irrigação, foram as mesmas, a diferença é que no cenário 7 foram implantadas técnicas de redução das taxas evaporativas no reservatório. Observa-se que o cenário 7 apresenta volume final, atendimento médio e todos os demais índices maiores que os dos calculados para o cenário 1, situação que se deve ao fato de o controle de perdas evaporativas provocar o aumento do volume de água armazenado a longo prazo, sem afetar a população, nem causar falhas no reservatório durante o período simulado.

Ainda da análise do cenário 7, outro ponto que deve ser observado é o fato de, apesar de o mesmo apresentar atendimento médio menor que os dos cenários 4, 5 e 6, apresenta vulnerabilidade menor que estes. Sabe-se que o atendimento médio e a vulnerabilidade são grandezas inversamente proporcionais, mas isso não ocorre na comparação dos cenários acima mencionados pois, na definição do cenário 7, as vazões iniciais utilizadas foram menores que nos cenários 4, 5 e 6, fazendo com que o percentual volumétrico de falha não variasse muito durante a simulação, pois não houve grande variação entre a vazão inicial, que já foi mais baixa, e as demais utilizadas no período simulado.

Da análise do cenário 8, como não houve redução no atendimento ao abastecimento à população e, conseqüentemente, não houveram falhas, a sustentabilidade e resiliência obtém o valor de 1 e a vulnerabilidade o valor zero. Percebe-se que teria sido possível chegar ao fim do período simulado, em março de 2017, com volume final armazenado maior do que o volume que o reservatório realmente atingiu nessa data, sem que houvesse a necessidade de a população ser submetida a nenhum regime de racionamento, apenas com a implementação de técnicas de redução das perdas evaporativas no reservatório. Fato que ratifica a importância e eficácia da utilização dessas técnicas em reservatórios submetidos a características climáticas semelhantes as enfrentadas pelo reservatório foco de estudo do presente trabalho.

De forma geral, considerando os resultados apresentados para todos os cenários, o cenário 6 se apresenta como uma boa alternativa a ser considerada.

Com o intuito de atenuar os problemas causados por uma crise hídrica e os regimes de racionamento aos quais a população é submetida, em futuros casos semelhantes ao atual, as medidas de gestão propostas seriam uma combinação das medidas mostradas em todos os cenários simulados neste trabalho, como: suspensão antecipada da irrigação, incentivo a medidas de combate à perdas por parte da CAGEPA no transporte e na distribuição de água e ao uso racional da água por parte da população, dando ênfase a estratégias de resposta à seca que não focam apenas na redução do consumo, mas também na eficiência do sistema, tendo em vista a importância de tais medidas, início do racionamento antecipado, dessa forma a diminuição do atendimento não seria tão rígida e repentina, e utilização de técnicas de redução das taxas evaporativas em reservatórios, tendo em vista que as mesmas apresentaram resultados expressivos nos cenários que as utilizaram.

Com base nos resultados obtidos e nas conclusões expostas, são feitas a seguir algumas recomendações que visam contribuir para o desenvolvimento de novas pesquisas tanto no sistema do reservatório Epitácio Pessoa, quanto na aplicação do AcquaNet como sistema de simulação em outros reservatórios com características semelhantes, são elas:

Dos resultados aqui apresentados, torna-se aparente que a inserção de técnicas de redução de evaporação nas bacias hidráulicas de reservatórios em climas de altas taxas evaporativas é fator determinante para um melhor aproveitamento hídrico dos mananciais. Portanto, mais estudos, que envolvam principalmente a viabilidade econômica da implantação dessas técnicas nos reservatórios da região, tornam-se necessários.

Como continuação desta pesquisa, é recomendável que sejam adicionados níveis de alerta ao modelo, de forma que, em ciclos mais longos de estiagem e de acordo com as previsões para continuidade ou não dessa seca, o modelo forneça volumes nos quais seria necessária tomar alguma medida de gestão, com o intuito de reduzir o volume de água retirado.

Acoplar o modelo de simulação a um modelo de otimização e a sistemas de suporte à decisão fornecendo um instrumento eficiente para auxiliar grupos de tomada de decisões na busca das melhores alternativas



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba. **Condições especiais de uso dos recursos hídricos no açude Epitácio Pessoa**, conforme Resolução nº 960, de 17 de agosto de 2015. Disponível em: <[http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/resolucoes/aesaana/RESOLU%C3%87%C3%83O%20ANA\\_AESA.pdf/](http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/resolucoes/aesaana/RESOLU%C3%87%C3%83O%20ANA_AESA.pdf/)>. Acesso em: julho de 2016. 2015.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba. **Volume de Açudes monitorados**. Disponível em: <<http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/volumesAcudes.do?metodo=preparaGraficos&codAcude=531/>>. Acesso em: março de 2017. 2017.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba. **Volume de Açudes monitorados**. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/monitoramento/volume-mensal/?tipo=outros>>. Acesso em: janeiro de 2018. 2018.

ALBANO, G. D.; PORTO, R. L. L. Integração de modelos matemáticos de quantidade e qualidade de água – Proposta de Gerenciamento de sistemas produtores de abastecimento público. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos**, XV, Curitiba. Anais. 2003.

ALBUQUERQUE, J. do P. T.; RÊGO, J. C. Subsídios para o gerenciamento racional e integrado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do estado da Paraíba. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS. 1999.

ALBUQUERQUE, A. S. O. **Avaliação da Influência das Mudanças Climáticas na Operação Ótima de Sistema de Reservatórios com Múltiplos Fins**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2008.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório de Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2013.

ANDRADE, P. R. G. S. **Estudo para alocação ótima das águas de um sistema de reservatórios em série e em paralelo, para usos e objetivos múltiplos, na bacia do rio Capibaribe, PE**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2006.

ARAGÃO, T. G. **Transposição das águas do rio São Francisco para a bacia do rio Paraíba: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo AcquaNet**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2008.

ARAÚJO, R. S.; ALVES, M. G.; CONDESSO DE MELO, M. T.; CHRISPIM, Z. M. P.; MENDES, M. P.; SILVA JÚNIOR, G. C. Water resource management: A comparative evaluation of Brazil, Rio de Janeiro, the European Union, and Portugal. **Science of the Total Environment**, v. 511, p. 815-828, 2015.

BACALHAU, J. R. **Simulação da disponibilidade hídrica e operação de reservatórios de abastecimento em relação à variabilidade climática: Bacia do Rio Pirapama em Pernambuco.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE. 2015.

BAKKER, K. Water security: research challenges and opportunities. Science, v. 337, n. 6097, p. 914-915, 2012.

BARBOSA, D. L. **A exploração de um sistema de reservatórios: uma análise otimizada dos usos e objetivos múltiplos na bacia do Rio Capibaribe-PE.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2008.

BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F. & NAKAYAMA, P. T. **Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos.** Revista brasileira de recursos hídricos - RBRH, vol. 3, nº 3. 1998.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília – DF: D.O.U. de 09/01/1997, P. 470, 1997.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília - DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2012. Brasília: SNSA/MCIDADES, 164 p. 2014.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V.; TUCCI, C. E. M. **Otimização de Regras de Operação de Reservatórios Utilizando um Algoritmo Evolutivo.** In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba. 2006.

BRITO, Y. M. A. de. **Níveis de implementação da política nacional de recursos hídricos: um comparativo entre a Bacia do Rio São Francisco e a Bacia do Rio Salitre-BA.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2017.

CAGEPA - Companhia de água e esgotos da paraíba. Série mensal de retiradas de água do Açude Epitácio Pessoa para tratamento e distribuição. (Comunicação pessoal). Campina Grande, PB. 2012.

CELESTE, A. B. **Determinação e análise de indicadores de desempenho e de sustentabilidade de seis açudes na bacia do rio Piancó-PB e de suas potenciais demandas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. (2006).

CHARNEY, B. A System Method for the Assessment of Integrated Water Resources Management (IWRM) in Mountain Watershed Areas: The Case of the “Giffre” Watershed (France). **Environmental Management**. v. 48, n. 1, p. 189-197, 2011.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Editora ABRH. 2013.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 396 de 03 de abril de 2008. **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. Brasília: CONAMA, 2008.

COSTA, H. A.; BURSZTYN, M. A. A.; NASCIMENTO, E. P. do. Participação social em processos de avaliação ambiental estratégica. **Revista Sociedade e Estado**, Brasília, v. 24, nº 1, p. 89-113, jan./abr. 2009.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Açude Boqueirão de Cabaceiras**. (2015) Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br/barragens/boqueirao/boqueirao.htm>>. Acesso em 20 jun. 2017.

FARIAS, E. E. V. de. **Distribuição da água do projeto de integração do rio são francisco no estado da Paraíba - eixo leste: análise de perdas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2009.

GALLOPIN, G. C. **Environmental and sustainability indicators and the concept of situational indicators: a system approach**. Environmental Modeling & Assessment, vol 1, p. 101-117, dezembro. 1996.

GANOULIS, J. G. **Engineering risk analysis of water pollution**. Weinheim: VCH Publishers Inc, 306 p. 1994.

GUIMARÃES, A. O.; MELO, A. D.; CEBALLOS, B. S. O.; GALVÃO, C. O.; RIBEIRO, M. M. R. **Aspectos da gestão do Açude Epitácio Pessoa (PB) e variação da qualidade de água**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, MS. 2005.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. **Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation**. Water Resources Research, 18(1), p. 14-20. 1982.

INSA - Instituto Nacional do Semiárido. **Recursos Hídricos em regiões semiáridas: Estudos e aplicações**. Ed. Hans RajGheyi. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas, BA. 2012.

JACOBI, P. R. **Gestão participativa de Bacias hidrográficas no Brasil e os desafios do fortalecimento de espaços públicos colegiados**. Livro Participação e Deliberação. Editora: 34. 2005.

LABADIE, J. W. **Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review**. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 130(2), p. 93-111. 2004.

LOUCKS D. P. **Sustainable water resources management**. Water International Journal, 25 (1), 3-10. 2000.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília, DF. 2006.

NUNES, T. H. C. **A gestão do reservatório Epitácio Pessoa e regras de operação otimizadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2015.

OLIVEIRA, K. F. de; RIBEIRO, M. M. R. **Análise de uma medida de gestão da demanda nas crises de abastecimento em Campina Grande**. Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luis-MA. 2004.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÃO, C. O.; LEITÃO, T. J. V. **Estimativa da Evaporação e Análise do Uso do Coeficiente (Kp) do Tanque “CLASSE A” nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 73-83. 2005.

OLIVEIRA, P. A. de.; CURI, R. C.; SANTOS, V. da S.; ABRANTES, G. G. A. de. **Técnicas modernas para a redução de evaporação em reservatórios de água em regiões semiáridas**. Anais do 4º Encontro Interdisciplinar da Paraíba, Sousa-PB, 2017.

PAIVA, J.B.D.de.; PAIVA, E.M.C.D. **Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH. 625 pp. 2001.

PARAÍBA. **Lei Estadual nº 6.308**, 02 de julho de 1996. Disponível em:<[http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/lei\\_E\\_11.pdf](http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2016/11/lei_E_11.pdf)> Acesso em: novembro de 2017.

RÊGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; RIBEIRO, M. M. R. Uma análise da crise 1998-2000 no abastecimento d'água de Campina Grande-PB. In: **V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Natal, RN. 2000.

RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; ALBUQUERQUE, J. do P. T. **Considerações sobre a gestão dos recursos hídricos do açude Epitácio Pessoa – Boqueirão na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba em cenário de vindouros anos secos**. in Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa, Nov. 2012.

RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. de O.; VIEIRA, Z. M. de C. L.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. do P. T.; SOUZA, J. A. de. **Atribuições e responsabilidades na gestão dos recursos hídricos – o caso do açude Epitácio Pessoa/Boqueirão no cariri paraibano**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves-RS. 2013.

RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. de O.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. do P. T.; SOUZA, J. A. de.; NUNES, T. H. C. **Novas considerações sobre a gestão dos recursos hídricos do açude Epitácio Pessoa - a seca 2012-2014**. XX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal, RN, 2014.

RÊGO, J. C.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; GALVÃO, C. O. **Participação da Sociedade na crise 1998-2000 no abastecimento d'água de Campina Grande-PB.** in Proceedings of the Fourth Inter-American Dialogue on Water Management, Foz do Iguaçu-PR. 2001.

RIBEIRO, M. A. de F. M. **Participação Pública em gestão de recursos hídricos: uma análise do caso paraibano.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2012.

SANTOS, B. B. M.; GUSMÃO, P. P. **Ampliando o debate sobre a lei das águas: uma consideração sobre os conflitos socioambientais.** Bento Gonçalves – RS: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2013.

SANTOS, M. B. Indicadores de sustentabilidade de reservatórios no semiárido brasileiro: uma proposta para a bacia do rio Jaguaribe – Ceará. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - CE. 2009.

SANTOS, V. da S. **Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2007.

SUASSUNA, J. **A pequena e média açudagem no semi-árido nordestino: uso da água na produção de alimentos.** Disponível em: <[http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=756&Itemid=376](http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=756&Itemid=376)>. Acesso em 13 fev. de 2018.

SILVA, A. C. S. **Análise Institucional da Governança da Água para Adaptação à Variabilidade e Mudança Climática um Caso no Semiárido Brasileiro (1997- 2013).** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2014.

SILVA, P. H. P. da.; RIBEIRO, M. M. R.; RÊGO, J. C.; MIRANDA, L. I. B. de.; **A gestão de recursos hídricos na visão midiática – o caso do açude Epitácio Pessoa/Boqueirão-PB.** Anais do XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE. Natal-RN. 2014.

SILVEIRA, G. L. da.; FORGIARINI, F. R.; CRUZ, J. C.; MATZENAUER, H. B.; DEWES, R. **A participação social no processo de implementação da cobrança pelo uso da água: o caso do comitê da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria/RS.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa, PB. 2005.

SOUZA Jr., W. C. **Gestão das águas no Brasil, reflexões, diagnósticos e desafios.** São Paulo: IEB Instituto Internacional de Educação do Brasil. 2009.

VIEIRA, Z. M. C. L. **Metodologia de análise de conflitos na implantação de medidas da gestão de demanda de água.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2008.

VIEIRA, Z. M. C. L.; RIBEIRO, M. M. R. **A Gestão de Recursos Hídricos no Estado Da Paraíba: Aspectos legais e institucionais.** In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo. 2007.